

UNIVERSIDAD DE PINAR DEL RÍO
"HERMANOS SAÍZ MONTES DE OCA"
FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS



APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LAS ARENISCAS
INTEMPERIZADAS DEL YACIMIENTO CASTELLANO

Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Geología
(Mención: Geología Ambiental)

Autor: Ing. Julio Cuni Calzada

Tutor: Dr. C. José Francisco Lastra Rivero

Pinar del Río

2015

DEDICADA A:

Mi madre (Dulce María),

Mi esposa (Yurizam),

Mis hijas (Tania y Celia),

Mi Familia (toda).

AGRADECIMIENTOS

Agradezco, en primer lugar a todos los profesores que impartieron el Curso de Maestría, en especial a mi tutor el Dr. C. José Francisco Lastra Rivero

Agradezco a mis compañeras y compañeros de estudio de maestría, en especial a Rolando Arango y Olga Klinchuk.

A Yoel Contrera y Elio Martínez, con quienes, desearía compartir siempre su entusiasmo y profesionalidad en trabajos, como en este proyecto.

A la Dirección de la Empresa Geominera de Pinar del Río, de forma destacada a su directora Ana María.

A mis compañeros de la Unidad Geólogo-Minera que apoyaron o participaron en este proyecto como Eduardo T. Royero, José A Ortega, René Otaño y Leoncio Podrón, Antonio Carmona, Nelson Estrada y tantos otros.

Si tu intención es decir la verdad, hazlo con sencillez y la elegancia déjasela al sastre.

A. EINSTEIN

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Los resultados que se exponen en la presente tesis se han alcanzado como consecuencia del trabajo realizado por el autor y asesorado y/o respaldado por la Empresa Geominera de Pinar del Río, Empresa Minera del Caribe (EMINCAR S.A.) y la Universidad de Pinar del Río. Por tanto, los resultados en cuestión son propiedad del autor y de estas instituciones y solo ellas podrán hacer uso de los mismos de forma conjunta y recibir los beneficios que se deriven de su utilización.

RESUMEN

Ubicado en Santa Lucía, Minas de Matahambre, Pinar del Río, las areniscas cuarzosas y cuarzo-feldespáticas, pertenecientes a la Formación San Cayetano (J_1 - J_3^2) parte inferior, constituirán escombros y, por consiguiente, contaminantes sólidos durante la explotación del yacimiento, prevista para los próximos años. El presente trabajo muestra los resultados de las investigaciones llevadas a cabo durante la evaluación de estas areniscas, con el objetivo de caracterizarlas a partir de sus propiedades físico-mecánicas y químicas fundamentales, para su uso como árido. Los trabajos fueron ejecutados en el período 2011-2014. Se utilizaron métodos empíricos y teóricos como las mediciones cualitativas y cuantitativas de las propiedades físicas-mecánicas y químicas de la roca, experimentos de laboratorio, técnicas de estadísticas, el análisis, la síntesis, deducción e inducción. Las técnicas empleadas consistieron en itinerarios geológicos, muestreo de rocas, tamizado a escala de laboratorio y planta piloto, determinación de las impurezas orgánicas, análisis químico de los óxidos principales y diseño de mezclas de morteros de albañilería. Como resultado de los trabajos se comprobó que estas rocas tienen bajos contenidos de azufre (0,28 % de SO_3) y de materia orgánica, se demostró que en el material retenido por el tamiz 4.76 mm se encuentran las rocas duras, a partir de las cuales se produce la arena adecuada para elaborar el mortero y obtener el granito (13-5 mm) y la gravilla (19-10 mm); mientras que el material pasado por el tamiz 4,76 mm, con una adecuada clasificación por los tamices 2 mm y 1 mm, permite obtener morteros para todos los usos. Las pruebas de hormigón hidráulico revelaron valores de resistencia a la compresión entre 3,7-24,1 MPa, lo cual avala su uso para muro portante y no portante de bloques y ladrillo para piso y distintos tipos de resanos. Los argumentos expresados anteriormente, sumados a los resultados positivos de los ensayos realizados para rellenos de viales (base y sub-base) realizados al material estudiado, permiten concluir que estas rocas tienen importancia económico y social, permitiendo concluir que estas rocas son viables para la industria de la construcción, posibilitando su uso a partir de un enfoque eco-integrador.

ABSTRACT

Located in Santa Lucía, Mines of Matahambre, Pinar del Río, the quartz-feldspathic sandstones belonging to the San Cayetano Formation (J_1 - J_3^2), its lower part, they will constitute waste and, consequently, solid pollutants during the exploitation of the deposit, foreseen for next years. The present work shows the results of the investigations carried out during the evaluation of these sandstones, with the objective of characterizing them starting from its fundamental physical-mechanical and chemical properties, for its use as aggregate. The works were executed in the period 2011-2012. Empirical and theoretical methods were used as the qualitative and quantitative measurements of the physical-mechanical and chemical properties of the rock, laboratory experiments, technical of statistical, the analysis, the synthesis, deduction and induction. The techniques employed consisted on geologic itineraries, sampling of rocks, sieved to laboratory and pilot plant scale, determination of the organic impurity, chemical analysis of the main oxides and mixtures design of masonry mortars. As a result of the works it was proven that these rocks have lower contained of sulfur (0,28 % of SO_3) and of organic matter, it was demonstrated that in the retained material by the sieve 4,76 mm is the hard rocks, starting from which the appropriate sand takes place to elaborate the mortar and to obtain the granite (13-5 mm) and the gravel (19-10 mm); while the last material for the sieve 4,76 mm, with an appropriate classification for the sieves 2 mm and 1 mm, it allows to obtain mortars for all the uses. The tests of hydraulic concrete revealed compressive strength values to among 3,7-24,1 MPa, that which endorses their use for wall and not wall of blocks and brick for floor and different restore types. The previously expressed arguments added to the assays positive results of the roads filling (its bases and sub-base) carried out to the studied material, they allow to conclude that these rocks have economic and social importance, allowing to conclude that these rocks are viable for the industry of the construction, facilitating their use starting from an eco-integrative focus.

ÍNDICE

INTRODUCCION	1
Capítulo I. Marco teórico-referencial	4
I.1. Generalidades.	4
I.1.1. Términos y definiciones.	4
I.1.2. Tipos de rocas para árido.	6
I.2. Parámetros que se determinan para evaluar la calidad de los áridos.	7
I.2.1. Composición química.	7
I.2.2. Composición granulométrica	8
I.2.3. Peso específico y densidad.	12
I.2.4. Otros parámetros físicos	14
I.2.5. Sustancias perjudiciales.	18
I.3. Antecedentes de la investigación.	19
I.4. Conclusiones parciales del capítulo.	24
Capítulo II. Características físico-geográficas y geológicas del área de estudio.	25
II.1. Características físico-geográficas.	25
II.2. Características geológicas.	28
II.2.1. Estratigrafía.	29
II.2.2. Magmatismo	31
II.2.3. Tectónica	31
II.2.4. Metamorfismo.	33
II.3. Geología del yacimiento pirito-polimetálico Castellano.	34
II.3.1. Litología	34
II.3.2. Magmatismo.	35
II.3.3. Mineralogía.	35
II.3.4. Tectónica	36
II.4. Conclusiones parciales del capítulo.	37
Capítulo III. Materiales y métodos.	38
III.1. Recopilación de datos de trabajos anteriores.	39
III.2. Trabajos de campo.	40
III.3. Ensayos y análisis de laboratorio.	43

III.3.1. Análisis químicos	43
III.3.2. Ensayos de propiedades físicas	44
III.4. Pruebas de uso.....	46
III.4.1. Materiales que conforman las aplicaciones.....	47
III.4.2. Muestreo del cemento.....	50
III.4.3. Diseño de mezclas y dosificaciones.	50
III.5. Procesamiento de los datos de campo y estimación de recursos.	53
III.6. Valoración de los beneficios ambientales.....	54
III.7. Conclusiones parciales del capítulo	55
Capítulo IV. Análisis y discusión de los resultados.....	56
IV.1. Resultados de los trabajos geológicos de campo.	56
IV.1.1. Itinerarios geológicos.	57
IV.1.2. Muestreo de rocas.....	58
IV.2. Propiedades de las areniscas.	59
IV.2.1. Composición química.	59
IV.2.2. Composición granulométrica.	59
IV.2.3. Principales propiedades físicas.	65
IV.3. Pruebas de uso para morteros de albañilería y hormigón hidráulico	67
IV.3.1. Dosificaciones de morteros de albañilería.	70
IV.3.2. Dosificaciones de hormigón hidráulico.	72
IV.4. Pruebas de uso de las areniscas como árido para viales.....	78
IV.5. Cartografía geológica y estimación de recursos.	80
IV.5.1. Caracterización de los itinerarios geológicos.....	80
IV.5.2. Interpretación del mapa geológico y cortes geológicos.....	81
IV.5.3. Estimación de recursos.	84
IV.6. Beneficio ambiental derivado de la utilización de las areniscas intemperizadas del yacimiento Castellano.	86
IV.6.1. Proyecto Minero Polimetálico Castellano	86
IV.6.2. Impactos ambientales definidos en el Proyecto Minero Polimetálico Castellano.	87
IV.6.3. Medidas para la mitigación de los impactos ambientales negativos.	91

IV.6.4. Aspecto económico-social	92
IV.7. Conclusiones y consideraciones parciales del capítulo.....	93
CONCLUSIONES.....	95
RECOMENDACIONES.....	96
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1. Formas de los áridos (Bañón, 2001).	17
Figura II.1. Ubicación geográfica del área de estudio.	25
Figura II.2. Mapa geológico de la región con el esquema tectónico ideado por Bárzana (1988).	29
Figura III.1. Diagrama de flujo de la investigación.....	39
Figura III.2. Procedimientos utilizados en el muestreo de surco.....	41
Figura III.3. Toma de la muestra (M-4) y colocación en el área de la planta industrial Cantera "La Lata".	43
Figura III.4. Esquema de la planta de trituración.	45
Figura III.5. Areniscas cuarzosas intemperizadas del yacimiento Castellano	47
Figura III.6. Cenizas en el patio de la antigua Planta Sulfometales (Depósito 3, imagen izquierda y Depósito 5, imagen derecha).....	49
Figura III.7. Intercalaciones de areniscas y limolitas caolinizadas	49
Figura III.8. Mezcladora.....	52
Figura IV.1. Mapa de datos reales de los trabajos ejecutados en el campo	56
Figura IV.2. Distribución de las fracciones granulométricas de la muestra M-4.....	64
Figura IV.3. Gráfico granulométrico para suelo (Fragoso <i>et al.</i> , 2014 ^a).	65
Figura IV.4. Corte de una vía. Posición de las capas base y sub-base.....	79
Figura IV.5. Mapa geológico del área de estudio	82
Figura IV.6. Cortes geológicos del área de estudio.	83
Figura IV.7. Contorno topográfico del área de estudio (a la derecha, el área definida por la Cota +70 m (Bloque 1, B-1) representada en 2D y 3D.	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.1. Especificaciones del índice de calidad (NC-54-264:1984 y NC-251: 2013).	8
Tabla I.2. Granulométrica del árido grueso (NC-251: 2013).	8
Tabla I.3. Granulometría para los áridos finos (NC-251: 2013).	11
Tabla I.4. Requisitos de calidad para el material más fino que el tamiz 75 μm para el árido fino (NC-251: 2013).	12
Tabla I.5. Requisitos según el índice de triturabilidad (NC-251: 2013).	16
Tabla I.6. Requisitos según el ensayo de abrasión (NC-251: 2013).	17
Tabla I.7. Sustancias perjudiciales en árido fino (NC-251: 2013).	18
Tabla I.8. Otras sustancias perjudiciales para el árido grueso (NC-251: 2013).	19
Tabla III.1. Relación de muestras para análisis químico.	42
Tabla IV.1. Composición granulométrica de la muestra M-1.	60
Tabla IV.2. Composición granulométrica de la muestra M-2.	61
Tabla IV.3. Composición granulométrica de la muestra M-3.	61
Tabla IV.4. Composición granulométrica para piedra (38-13 mm).	63
Tabla IV.5. Composición granulométrica para granito (12-5 mm)	64
Tabla IV.6. Composición granulométrica para arena artificial (5-0.15 mm)	64
Tabla IV.7. Peso específico de las areniscas.	66
Tabla IV.8. Coeficiente de absorción determinado a la muestra M-4	67
Tabla IV.9. Composición granulométrica de la ceniza de tostación de la pirita	68
Tabla IV.10. Composición granulométrica de las partículas arenosas.	69
Tabla IV.11. Comportamiento de las partículas limo-arcillosas.	70
Tabla IV.12. Granulometría de las partículas menores de 75 μm	70
Tabla IV.13. Dosificaciones para mortero de albañilería (para elementos de pared).	71
Tabla IV.14. Resultados de la resistencia a la compresión del mortero de colocación.	72
Tabla IV.15. Materiales utilizados en las dosificaciones.	73
Tabla IV.16. Dosificación No. 1	73
Tabla IV.17. Dosificación No. 2	74
Tabla IV.18. Dosificación No. 3	74
Tabla IV.19. Dosificación No. 4	74
Tabla IV.20. Dosificación No. 5	75

Tabla IV.21. Materiales utilizados para las dosificaciones.	76
Tabla IV.22. Dosificación No. 1.....	76
Tabla IV.23. Dosificación No. 2.....	77
Tabla IV.24. Dosificación No. 3.....	77
Tabla IV.25. Parámetros de calidad para base de viales	79
Tabla IV.26. Parámetros de calidad para sub-base de viales.	80

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo textual 1. Caracterización de los surcos muestreados.....	104
Anexo textual 2. Composición química de las areniscas intemperizadas del yacimiento Castellano	107
Anexo textual 3. Composición granulométrica de la muestra M-3.	108
Anexo textual 4. Resultado de los ensayos para las cenizas de tostación de la pirita	110
Anexo textual 5. Composición química de las cenizas de tostación de la pirita	111
Anexo textual 6. Resultado de los ensayos de los cementos.....	112
Anexo textual 7. Dosificaciones para morteros.....	114
Anexo textual 8. Dosificaciones óptimas para mortero	118
Anexo textual 9. Cálculo del volumen de areniscas intemperizadas.....	124
Anexo textual 10. Cálculo de los recursos de areniscas y limolitas intemperizadas.	125

INTRODUCCION

La demanda mundial de materiales de construcción se amplía cada vez más. En Cuba se conocen 75 variedades de materias primas no metálicas, una parte de las cuales se puede utilizar como áridos naturales. En la provincia de Pinar del Río se explotan las arenas de los yacimientos Batey Sánchez, ESBU 19 y Km 13 Viñales, etc., pero el volumen de recursos de estos yacimientos no se corresponde con la demanda cada vez más creciente, no sólo en la provincia de Pinar del Río sino en todo el país.

En el municipio Minas de Matahambre solamente, según los datos de la Dirección de la Vivienda del Poder Popular, se previó un estimado de más de 10000 m³ de arena para el quinquenio 2012-2017; de ahí la urgencia de incrementar las producciones de áridos triturados.

En general, las rocas carbonatadas (calizas, calizas dolomíticas) son las más utilizadas mundialmente como áridos. Pero, también se emplean areniscas cuarzosas y otras rocas silíceas de otros orígenes.

En nuestro país también son preponderantes las calizas y dolomitas; no obstante, se utilizan además areniscas calcáreas, silicíticas, tobas zeolitizadas, entre otras rocas.

Las areniscas de composición cuarzo-feldespáticas, a veces cuarcitizadas, están ampliamente representadas en la región noroccidental de la provincia de Pinar del Río, asociadas fundamentalmente a la secuencia terrígena del Miembro Inferior Indiferenciado de la Formación San Cayetano (J₁-J₃²). Estas se encuentran ubicadas en el yacente de los cuerpos pirito-polimetálicos (Pb-Zn) del yacimiento Castellano y ocupan la zona de intemperismo de la secuencia a la que pertenecen.

La población local fue la primera que utilizó estas areniscas en la construcción de viviendas (diferentes tipos de morteros y material de relleno). En los primeros años de la década de los 90 también fue utilizada como capa base en la construcción de una parte del pedraplén que unió a la zona de Santa Lucía con Cayo Jutía, aunque no se conocen datos oficiales al respecto.

Los trabajos de evaluación de estas areniscas como áridos, fueron iniciados en el segundo trimestre del año 2011, por la Empresa Geominera de Pinar del Río, bajo un contrato (No.

12106010) de proyecto de investigación de los materiales no metálicos a emplear en la construcción, ejecutado por La Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) a través de la Unidad de Investigación para la Construcción de Pinar del Río, subordinada al Ministerio de la Construcción. El proyecto general, por el cliente (Empresa Geominera de Pinar del Río), fue ejecutado por un grupo de especialistas liderado por el Ing. Yoel Contrera Hernández.

El objetivo de la investigación fue evaluar las areniscas para hormigones hidráulicos y morteros de albañilería.

En el segundo trimestre del 2014 se realizó el contrato (No. 14900514) solicitado por la Empresa Minera del Caribe (EMINCAR S.A.) donde se evaluaron las areniscas como áridos gruesos y para viales (base y sub-base).

Las areniscas estudiadas vendrán a constituir escombros en el Proyecto Minero Polimetálico Castellano, por ende, un contaminante sólido del medio ambiente circundante de la futura mina. Por ello se tuvo en cuenta un enfoque ecointegrador, de manera que se empleen racionalmente esos materiales, identificando los impactos ambientales y el beneficio económico-social y ambiental derivado de su uso.

Por estas razones se propuso el siguiente diseño de investigación:

Problema científico: Desconocimiento de las principales características (propiedades físico-mecánicas y químicas) de las areniscas intemperizadas del yacimiento Castellano y del beneficio ambiental que puede reportar la explotación de los escombros de estas resultantes del proceso minero en el yacimiento Castellano.

Objeto: Propiedades físicas, físico-mecánicas, composición química y reservas de las areniscas intemperizadas del yacimiento Castellano.

Objetivo General:

Evaluar integralmente los beneficios socio-económicos y ambientales que reporta el uso de las areniscas intemperizadas del yacimiento Castellano como árido.

Objetivos específicos:

- 1- Caracterizar las propiedades físico-mecánicas y composición química de las areniscas intemperizadas del yacimiento Castellano.

- 2- Determinar los posibles usos como árido que se le pueden dar a los escombros derivados de la explotación del yacimiento Castellano.
- 3- Estimar los recursos disponibles de areniscas intemperizadas para áridos.
- 4- Valorar las variables ambientales vinculadas con la explotación del yacimiento Castellanos y el aprovechamiento de las areniscas intemperizadas..

Hipótesis:

Mediante la definición de las propiedades físicas, físico-mecánicas, composición química y reservas de las areniscas intemperizadas presentes en el área del yacimiento Castellano y de sus dosificaciones, será posible optimizar los posibles usos que se les darán como áridos y ofrecer una valoración de los beneficios socio-económicos y ambientales que se derive de estos.

Las tareas de la investigación son:

- Recopilación y análisis de los trabajos relacionados con las areniscas utilizadas como materiales de construcción.
- Toma de muestras en el campo y su preparación.
- Determinación de propiedades físicas y físico-mecánicas de la materia prima.
- Análisis químicos de la materia prima.
- Diseño de las dosificaciones de los materiales y hormigones según las aplicaciones a ensayar.
- Ensayos de resistencia a la compresión a las aplicaciones de las mezclas diseñadas.
- Determinación de las dosificaciones más adecuadas.
- Ensayos de uso para rellenos de viales (bases y sub-bases).
- Cálculo de los recursos disponibles de areniscas intemperizadas.
- Caracterización de las variables ambientales a través del uso de las areniscas intemperizadas.

Capítulo I. Marco teórico-referencial

Este capítulo tiene el objetivo de constituir la base teórica que fundamenta el trabajo de investigación de las areniscas intemperizadas del yacimiento Castellano para su uso como árido y el empleo en dosificaciones de morteros de albañilería, hormigones y como relleno de viales, así como la determinación del beneficio ambiental derivado de su uso como material de construcción.

Para la realización de este capítulo se utilizó la bibliografía publicada en documentos legales, artículos de eventos científicos y técnicos nacionales e internacionales, materiales de informes de archivos, revistas y libros especializados, atlas y documentos en formato digital, algunos de ellos consultados directamente en Internet, así como, la consulta popular sobre la experiencia de la práctica en el uso de las rocas estudiadas en la localidad.

I.1. Generalidades.

Se recogen en este epígrafe los principales términos y definiciones más importantes que establecen los vocablos utilizados en los trabajos de la investigación realizada y su correspondencia con los empleados en la literatura consultada.

I.1.1. Términos y definiciones.

Árido: Material mineral procedente de rocas que se encuentran desintegradas en estado natural o precisan de trituración mediante procesos industriales. Las dimensiones son diferentes, varían desde 0,149 mm hasta un tamaño máximo especificado (NC-251: 2005 y NC-251: 2013). Bañón (2001) lo define como las partículas de roca, unidas con o sin ligante, pero lo considera constituyendo parte o la totalidad de una obra civil.

Árido natural: Material granulado procedente de las rocas trituradas natural o artificialmente cuyas dimensiones varían desde 0,074 mm hasta el tamaño máximo especificado, que puede llegar a ser en casos especiales de 250 o 300 mm (NC-54-395: 1987).

Árido artificial: Material granular obtenido de material natural y de desechos mediante procesos de elaboración térmica y de otros tipos (NC-54-395: 1987).

Árido fino (arenas): Árido que posee las partículas desde 0,149 mm hasta 4,76 mm, los cuales puede estar descritos como arena natural (cernida o beneficiada) y como arena de grava triturada y arena de roca triturada (NC-251: 2013).

Árido grueso: La Norma Cubana (NC-54-395:1987) define el árido grueso como aquel que posee partículas de un tamaño superior a 5 mm. Árido que posee partículas principalmente, de un tamaño superior a 4,76 mm (NC-251: 2013).

Árido triturado o machacado (piedra triturada): Producto que resulta de la trituración artificial de las rocas, tales como calizas, granitos, basaltos y otros (NC-54-395: 1987). Árido grueso que se obtiene mediante la trituración de la roca y de procesos de clasificación y lavado (NC-251: 2013).

Árido reciclado: Árido obtenido mediante el procesamiento de residuos de construcción y demolición. En función de la naturaleza de los residuos de origen, los áridos reciclados se pueden clasificar en áridos reciclados procedentes de hormigón, árido reciclados cerámicos o áridos mixtos cuando proceden de una mezcla de residuos de distinta naturaleza.

Árido ligero: Material natural o artificial cuya cota densidad aparente es inferior a 1000 g/cm³, tales como arcilla expandida o sintetizada, vermiculita, perlita, pómez, cenizas volcánicas, tobas, cenizas volantes sintetizadas o cenizas industriales empleadas en hormigones y morteros de baja densidad (NC-657: 2008). Elías (2000) lo define como un material física y químicamente neutro, que no desprende gases ni malos olores, no se pudre y no es atacable por parásitos, hongos o roedores. No le afectan las sustancias químicas y es altamente resistente a las heladas y a los cambios bruscos de temperaturas.

Fino o filler: Material inerte finamente dividido, empleado para disminuir la retracción, actuar como extensores y mejorar la laborabilidad, la coherencia en morteros y hormigones (NC-251: 2013). Material que pasa el tamiz de 0.075 mm (NC-59: 2000).

Adición: Material que en una cantidad limitada, es molido simultáneamente o mezclado con el cemento hidráulico durante su fabricación. Se conocen dos tipos de adición: la funcional y la coadyuvante del proceso (N-526: 2007).

Adicionante: Material inorgánico finamente dividido (ni árido, ni aglomerante) que se puede añadir al mortero para mejorar determinadas propiedades u obtener otras propiedades particulares (C 175: 2002).

Aditivo: Sustancias que, agregadas al hormigón, cuando aún no está endurecido, producen una mejora en alguna de sus propiedades (ejemplo: cambios en el tiempo de fraguado, mejora de la laborabilidad del hormigón, etc.) es necesario conocer muy bien el funcionamiento de los aditivos, ya que un abuso de los mismos puede originar efectos perjudiciales. Los aditivos pueden ser artificiales y naturales.

Material añadido en pequeñas cantidades con relación a la masa del cemento, antes o durante la mezcla del mortero, de manera que aporte a sus propiedades determinadas modificaciones bien definidas (NC 175: 2002).

Cemento: Cemento hidráulico producido mediante la pulverización del clinker de cemento Portland y usualmente contiene sulfato de calcio. NC 526: 2007.

Limpieza: Condición del árido de no poseer, excesivamente, contenidos de materia orgánica, polvo o partículas arcillosas. Así se refieren las normas cubanas (NC-185: 2002; NC-251: 2013).

Plasticidad: Fracción fina del suelo, representada por arcilla y limo, que puede estar sola o formar parte de los materiales gruesos, se identifica de acuerdo a sus características plásticas (NC-59: 2000).

Adhesión: Resistencia a la tracción máxima de la unión entre un mortero y un soporte definido, se determina por un ensayo de arrancamiento directo perpendicular a la superficie del mortero (NC-172: 2002).

I.1.2. Tipos de rocas para árido.

Internacionalmente, todos los tipos de rocas: ígneas, metamórficas y sedimentarias, se utilizan como árido triturado. Batista *et al.* (2005) identificó las principales rocas que se emplean con esos fines en Cuba:

- Calizas y calizas dolomíticas (roca sedimentaria, amplia distribución, explotación masiva)
- Tobas zeolíticas (volcánica, amplia distribución)

- Andesitas (roca magmática más abundante)
- Areniscas cuarcíferas (roca sedimentaria, alta calidad)
- Calcarenitas o areniscas calcáreas (limitadas)

I.2. Parámetros que se determinan para evaluar la calidad de los áridos.

Estos parámetros tienen una naturaleza química, mineral y físico-mecánica y determinan las características, propiedades y la calidad del árido.

I.2.1. Composición química

La composición química de los áridos, provenientes de depósitos naturales, se define por la naturaleza de los minerales (carbonato, cuarzo, feldespático, etc.) que conforman las rocas de donde provienen, a la influencia de procesos metalogénicos posteriores al origen de las rocas (vetillas de sulfuros, carbonatos, cuarzo, etc.), procesos singenéticos (pirita en calizas) y también los efectos de procesos exógenos (intemperismo). En el caso de las rocas estudiadas en este trabajo se conjugan la mayoría de los procesos.

La norma cubana (NC-251: 2013) especifica las sustancias químicas que afectan la calidad de los áridos, las cuales son:

- Sulfato de calcio (yeso)
- Sulfuro de hierro (pirita)
- Trióxido de azufre (SO_3)
- Carbón y lignito
- Cloruro (Cl^-)
- Alcali (Óxido de sodio)

Otras sustancias que pueden ser nocivas para los áridos, según la norma (NC-251: 2013) son: coke, ceniza, escoria, asfalto, y otros

La tabla I.1 muestra los índices de calidad que caracterizan la composición química del polvo de piedra.

Tabla I.1. Especificaciones del índice de calidad (NC-54-264:1984 y NC-251: 2013).

Composición química	% m/m (máx.)
Trióxido de azufre (SO ₃)	1
Carbón y lignito	0,5
Sulfato de calcio (yeso)	Pequeña cantidad
Sulfuro de hierro (pirita)	Pequeña cantidad

I.2.2. Composición granulométrica

Es importante conocer la distribución granulométrica, debido a que ella influye en la resistencia mecánica del hormigón y la capa de firme que contenga dicho árido.

Los requisitos granulométricos para los áridos gruesos y finos se establecen en la (NC-251: 2013).

A. Granulometría para los áridos gruesos.

Es importante conocer la distribución granulométrica, debido a que ella influye en la resistencia mecánica del hormigón y la capa de firme que contenga dicho árido. Los requisitos granulométricos para los áridos gruesos se establecen en la Norma (NC-251: 2013) (tabla I.2).

Tabla I.2. Granulométrica del árido grueso (NC-251: 2013).

Límites de la fracción (mm)		Alturas de las mallas de tamices normalizados (mm)	% pasado
Nominal	Equivalente		
90 - 40	90-37,5	90,0	100
		75,0	90 - 100
		63,0	25 - 60
		37,5	0 - 15
		19,0	0 - 5
65 - 40	63 – 37,5	75,0	100
		63,0	90-100

		50,0	35-70
		38,1	0 - 15
		19,0	0 - 5
40 - 20	37.5 - 19,0	50,0	100
		37,5	90-100
		25,0	20-55
		19,0	0 - 15
		9,50	0 - 5
40 - 10	37,5 - 9,50	50,0	100
		37,5	95-100
		19,0	35-70
		12,5	10-30
		9,5	0-5
25 - 10	25,0 - 9,50	37,5	100
		25,0	90-100
		19,0	20-55
		12,5	0-10
		9,5	0-5
25 - 5	25,0 - 4,75	37,5	100
		25,0	95-100
		12,5	25-60
		4,75	0-10
		2,36	0-5
20 - 10	19,0 - 9,50	25,0	100
		19,0	90-100
		12,5	20-55
		9,5	0-15
		4,75	0-5
20 - 5	19,0 - 4,75	5,0	100
		19,0	90-100

		9,5	20-55
		4,75	-10
		2,36	0-5
13 - 5	12,5 - 4,75	19,0	100
		12,5	90-100
		9,5	40-70
		4,75	0-15
		2,39	0-5
10 - 5	9,50 - 4,75	12,5	100
		9,5	85-100
		4,75	15-35
		2,36	0-10
		1,18	0-5

Material más fino de 75 µm o No. 200 (tamiz 0,074 mm):

Independientemente a los rangos de granulometría que se muestran en la Tabla I.2, se calcula además el material más fino de 75 µm o No. 200 (tamiz 0,074 mm), llamado también fracción ultrafina o *filler* en el árido grueso (NC-182: 2002). Es un parámetro que determina el por ciento de material fino que contiene el árido. Se calcula con arreglo a la fórmula siguiente:

$$\text{Porcentaje de material que pasa por el tamiz 0,074 mm (No. 200)} = \frac{a - b}{a} \cdot 100$$

donde:

a: peso de la muestra original seca

b: peso de la muestra seca después de lavada

B. Granulometría para los áridos finos

Como se conoce, la Norma Cubana (NC 54-395:1987) considera que el árido fino (arenas) es el que posee partículas de un tamaño inferior a 5,0 mm. De igual manera lo define la

Norma Cubana (NC-251: 2013); pero, establece además el límite inferior de 150 μm , es decir, que cumplirá con los rangos granulométricos establecidos en la tabla I.3.

Tabla I.3. Granulometría para los áridos finos (NC-251: 2013).

Límite de las fracciones		Abertura de mallas de tamices normalizados	% Pasado
Nominal	Equivalente		
5 – 0,15	4,75 – 0,150	9,5 mm	100
		4,75 mm	90 - 100
		2,36 mm	70 - 100
		1,18 mm	45 - 80
		600 μm	25 - 60
		300 μm	10 - 30
		150 μm	2 - 10

Material más fino de 75 μm o No. 200 (tamiz 0,074 mm).

Un parámetro que determina la calidad del árido fino es el **módulo de finura**, el cual se define como el número que resulte de sumar los tantos por cientos retenidos acumulados de aquellos tamices que están en relación 2:1 y luego divididos por cien (NC-54-395: 1887). Es la suma de los resultados totales de la muestra cernida o tamizada (de un diámetro menor de 5 mm) en los tamices 2,5; 1,25; 0,63; 0,30 dividida entre 100.

La Norma Cubana (NC-251:2013) establece las siguientes consideraciones sobre este parámetro, que deciden las características de calidad en este árido:

- El rango del módulo de finura para los áridos finos será entre 2,2 y 3,58.
- Los áridos finos no podrán tener una cantidad mayor de material más fino que el tamiz 0,074 mm que lo que se especifica en la norma (3 %, para hormigones sometidos a la abrasión y 5 %, para todos los restantes hormigones).

La tabla I.4 muestra las exigencias para el material más fino que el tamiz 75 μm para los áridos finos (NC-251: 2013).

Tabla I.4. Requisitos de calidad para el material más fino que el tamiz 75 µm para el árido fino (NC-251: 2013).

Tipo de arena	Tipo de hormigones	Tamiz de 75 µm (No. 200) (%)
Áridos finos Arenas no trituradas y beneficiadas de yacimiento y arenas de rocas trituradas	Hormigones sometidos a la abrasión y a la exposición al ambiente marino	3
	Todos los restantes hormigones	5
<p>Nota: En el caso de las arenas de rocas trituradas si el material más fino que el tamiz 75 µm (No 200), consiste del polvo de la fractura esencialmente libre de arcilla y de esquisto, los límites expresados en esta Tabla pueden incrementarse a:</p> <p>5 % Para hormigones sometidos a la abrasión</p> <p>7 % para los restantes hormigones.</p>		

I.2.3. Peso específico y densidad.

- **Peso específico**

El peso específico tiene una estrecha relación con la absorción y se obtiene por medio del pesaje del material en estado seco (a temperatura de 105-110 °C) y saturado en agua durante 24 horas (NC-186: 2002 y NC-187: 2002). Se expresa como peso específico corriente, saturado y aparente.

Peso específico corriente

El peso específico de las partículas desecadas incluyendo en el volumen los poros accesibles al agua y los no accesibles, se calcula aplicando la formula siguiente:

Para árido grueso

$$\text{Peso específico corriente} = \frac{A}{B - C}$$

donde:

A: Peso en el aire de la muestra secada en estufa (g)

B: Peso en el aire de la muestra saturada y superficialmente seca (g)

C: Peso en el agua de la muestra saturada (g)

Para árido fino

$$\text{Peso específico corriente} = \frac{A}{C + B - C1}$$

donde:

A: Peso en gramos de la muestra secada en la estufa

B: Peso en gramos de la muestra saturada con superficie seca

C: Peso en gramos del frasco lleno con agua

C1: Peso en gramos del frasco con la muestra y agua hasta la marca del enrase

- **Peso específico saturado**

El peso específico de las partículas saturadas de agua y con la superficie seca, incluyendo en el volumen los poros accesibles al agua y los no accesibles, se calcula aplicando la formula siguiente:

Para árido grueso

$$\text{Peso específico saturado} = \frac{B}{B - C}$$

donde:

B: Peso en el aire de la muestra saturada y superficialmente seca (g)

C: Peso en el agua de la muestra saturada (g)

Para árido fino

$$\text{Peso específico saturado} = \frac{B}{C + B - C1}$$

donde:

B: Peso en gramos de la muestra saturada con superficie seca

C: Peso en gramos del frasco lleno con agua

C1: Peso en gramos del frasco con la muestra y agua hasta la marca del enrase

- **Peso específico aparente**

El peso específico de las partículas desecadas incluyendo en el volumen sólo los poros inaccesibles al agua, se calcula aplicando la formula siguiente:

Árido grueso

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{A - C}$$

donde:

A: Peso en el aire de la muestra secada en estufa (g)

C: Peso en el agua de la muestra saturada (g)

Árido fino

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{C + A - C1}$$

donde:

A: Peso en gramos de la muestra secada en la estufa

C: Peso en gramos del frasco lleno con agua

C1: Peso en gramos del frasco con la muestra y agua hasta la marca del enrase

- **Densidad o peso volumétrico.**

Por otra parte, la densidad (peso volumétrico) se determina por medio de pesadas del material contenido en recipientes calibrados de volumen conocido.

Es la relación entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa. Cada sustancia, en su estado natural, tiene una densidad característica. También cada tipo de árido, en dependencia del material que posea, tiene su propia densidad.

I.2.4. Otros parámetros físicos

No menos importante que el peso específico y la densidad otras propiedades físicas son la porosidad y la absorción, vinculados directamente con los mencionados antes, los cuales son determinantes para la durabilidad del árido utilizado, teniendo en cuenta lo expresado

por Bañón (2001) al considerar que un mayor número de huecos favorece la penetración del agua, que deposita en los poros las sales disueltas en su seno, provocando la rotura del árido por un proceso cristalino (hialoclastia).

- **Durabilidad de los áridos.**

La durabilidad es la disposición de los áridos al exponerse a la acción erosiva de los agentes atmosféricos como el agua, el viento, etc.; por esas razones, es necesario determinar la porosidad, la absorción de agua y el peso específico del árido. Estos términos fueron definidos por la norma (NC-54-495: 1987) y constituyen propiedades básicas de los áridos gruesos y finos (NC-186: 2002, NC-187: 2002). Los pesos específicos fueron descritos en el sub-epígrafe I.2.3. A continuación se hace referencia a la porosidad y la absorción.

A. Porosidad.

Se define como la relación del volumen de los poros al volumen total del material.

B. Absorción.

Es la cantidad de agua absorbida por un árido por inmersión durante 24 horas, expresado como porcentaje de su masa seca.

El por ciento de agua absorbida por la arena seca, se calcula aplicando la fórmula siguiente:

$$\% \text{ de absorción} = \frac{B - A}{A} \cdot 100$$

donde:

A: Peso en gramos de la muestra secada en la estufa (g)

B: Peso en gramos de la muestra saturada con superficie seca (g)

La absorción del árido, generalmente, no superará el 3 % de la masa seca del mismo (NC-251: 2013).

- **Índice de triturabilidad (IT).**

Se define como el número en por ciento que expresa la resistencia a la trituración de una fracción de árido grueso, sometida a esfuerzo de compresión constante (NC-54-395: 1987).

Se determina seco y húmedo, a partir de la fórmula siguiente:

$$IT = \frac{m1 + m2}{m1} \cdot 100$$

donde:

m1 – Masa de la porción de árido grueso a triturar (g)

m2 – Masa de la porción de árido grueso triturada y retenida en el tamiz de control (g)

En la tabla I.5 se muestran los índices de triturabilidad por tipo de hormigón (NC-251: 2013).

Tabla I.5. Requisitos según el índice de triturabilidad (NC-251: 2013).

Tipo de hormigón	Índice de triturabilidad	
	Seco	Húmedo-saturado
Pavimento de hormigón para tráfico pesado Resistência fck ≥ 35 MPa	Menos de 15	Menos de 25
Pavimentos y pisos sometidos a desgaste. Hormigón arquitectónico, expuesto a diferentes tipos de erosiones.	20 - 15	35 - 25
Otros tipos de hormigones Resistencia fck ≤ 35 MPa	35 - 20	50 - 35

- **Coefficiente de desgaste de Los Ángeles (% D).**

Es llamado así porque fue en esa ciudad de California (USA) donde empezó a utilizarse. Este ensayo trata de medir la pérdida de masa que sufre un árido al someterse a un proceso continuo de desgaste. Está dado por la relación entre la masa perdida inicial y final y el peso inicial de la masa de árido (NC-188: 2002).

Se determina por la fórmula siguiente:

$$\% D = \frac{PI + PF}{PI} \cdot 100$$

donde:

PI: Peso inicial

PF: Peso Final

En la tabla I.6 se presentan los requisitos de calidad según el Índice de Abrasión.

Tabla I.6. Requisitos según el ensayo de abrasión (NC-251: 2013).

Tipo de hormigón	Abrasión (% máx.)
Hormigones sometidos a la erosión elevada y hormigones arquitectónicos y de obras marítimas.	30
Hormigones sometidos a desgaste en pavimentos para tráfico vehicular y peatonal. Resistencia $F_{ck} \geq 35$ MPa	4
Otros tipos de hormigón. Resistencia $F_{ck} \leq 35$ MPa	50

- **Partículas planas y alargadas.**

Dos características que constituyen parámetros de los áridos gruesos y tienen una influencia directa en el comportamiento de la granulometría son: la forma (morfología) y el tamaño de los áridos, lo cual está determinado por las partículas planas y alargadas.

La forma de los áridos está relacionada a la aptitud con el esqueleto mineral, de su resistencia mecánica (Bañón, 2001).

Según la forma se distinguen cuatro tipos de áridos: cúbicos, redondeados, lajas y agujas (figura I.1).



Figura I.1. Formas de los áridos (Bañón, 2001).

La laja es todo árido cuyo espesor sea inferior a $3/5$ del tamaño medio del espesor de la fracción mineral correspondiente. Aguja es cualquier árido cuya longitud sea superior en $9/5$ el tamaño medio del árido.

Para determinar la proporción de las lascas y las agujas, se define el Índice de lascidad y apuntamiento, el cual es el porcentaje en peso de lascas o agujas, respectivamente, sobre el total de la muestra (Bañón, 2001).

La Norma Cubana (NC-189: 2002) determina que se calculan los porcentajes de partículas planas y alargadas halladas en cada muestra ensayada aplicando la fórmula siguiente:

$$PPA = \frac{A}{B} \cdot 100$$

donde:

PPA: Por ciento en masa de partículas planas y alargadas (%)

A: Masa de las partículas planas y alargadas halladas en cada muestra ensayada (g)

B: Masa de la muestra ensayada (g)

I.2.5. Sustancias perjudiciales

Los parámetros que se muestran en la tabla I.7 determinan los índices de calidad de los áridos (NC-251: 2013).

Tabla I.7. Sustancias perjudiciales en árido fino (NC-251: 2013).

No.	Indicadores de calidad	Cantidad máxima del peso total de la muestra (%)
1	Partículas arcillosas	1
2	Impurezas orgánicas	Máximo Placa 3
Nota: No se aplican a los áridos de yacimiento.		

Los requisitos de calidad establecidos por la Norma Cubana (NC-251: 2013) para proporción de las partículas arcillosas y la cantidad de partículas planas y alargadas en los áridos gruesos, aparecen en la tabla I.8. A pesar de que la roca estudiada no se menciona en esa tabla, la presencia de silicificación en las areniscas, permite asumir cualquiera de los valores de calidad que se relacionan, así como la presencia de la caolinita en el material determinan los valores de partículas arcillosas.

Tabla I.8. Otras sustancias perjudiciales para el árido grueso (NC-251: 2013).

No.	Indicadores de calidad	Cantidad máxima del peso total de la muestra (%)
1	Partículas de arcillas	Inferior o igual a 0,25 %
2	Cantidad de partículas planas y alargadas (ver NC189): Para áridos provenientes de rocas calizas Para áridos provenientes de rocas ígneas	Inferior o iguales a 10 % Inferior o iguales a 20 %

I.3. Antecedentes de la investigación.

A pesar de que las areniscas, después de las lutitas, son las rocas sedimentarias más difundidas en el mundo (<http://es.wikipedia.org/wiki/arenisca>), no existe, prácticamente, registro de la información local o nacional pretérita suficiente, hasta ahora, que avalen a las areniscas cuarzosas y cuarzo-feldespáticas del noroccidente de la provincia de Pinar del Río como uso productivo.

El Atlas de Asociaciones Minerales en Lámina Delgada. Biblioteca de la Universidad de Barcelona (2003) recoge la definición de arenisca ofrecida por Jackson y Bates (1987) como rocas clásticas litificadas y constituidas por granos de dimensiones arenosas de cualquier origen y composición. En esos términos se pronuncia también el Diccionario de la Real Academia Española (DRAE), Segura (1973), Hamilton *et al.* (1998) y Montgomery (1997).

El “Equipo editorial construcción. Visa” (2014) en su artículo "La arenisca y la piedra caliza en construcción" define las areniscas como rocas silíceas de origen sedimentario, constituida básicamente por granos de cuarzo con inclusiones de feldespato, que se caracterizan por su blandura y facilidad de talla. Sufren un proceso de metamorfismo y se transforman en cuarcitas. La densidad está entre 2,11 y 2,5 kg/dm³, la resistencia a la compresión varía de 232-364 kg/dm²; la resistencia a la flexión oscila entre 50 y 62 kg/dm²; la resistencia a los impactos está entre 30-45 cm y el coeficiente de absorción tiene valores medios de alrededor de 5 % y pueden llegar a alcanzar hasta 13 %.

El uso de las areniscas cuarzosas como materiales de construcción es, de hecho, una práctica mundial desde hace mucho tiempo. Se conoce que las areniscas fueron de las rocas utilizadas en las grandes obras arquitectónicas construidas durante el período barroco en México (años 1600-1750), el cual llegó hasta la primera mitad del siglo XVIII (Encarta, 2009).

Giganto *et al.* (2006) en su valoración sobre los áridos silíceos, a pesar de que al compararlo con los áridos que se elaboran de calizas, concluyó que estos últimos tienen mejores cualidad; sin embargo, deja entrever que las rocas silíceas clasifican como materiales utilizados para la construcción de hormigones.

Moreno (2006) en los ensayos de laboratorio para hormigón de áridos reciclados a partir de caliza y de rocas silíceas, demostró las cualidades del árido silíceo al lograrse valores de resistencia a la compresión a los 7 días de 30,3-39,0 N/mm² (MPa) y a los 28 días de 37,5-46,0 N/mm² (MPa).

Las areniscas más utilizadas en nuestro país tienen una composición carbonatada (areniscas calcáreas). Se conocen varios yacimientos explorados y explotados, fundamentalmente, en la provincia de La Habana (Batista *et al.*, 2013).

Toda la literatura consultada sobre la roca objeto de estudio en este trabajo coincide con el origen sedimentario y clástico-litificado y la mayoría de los autores destacan el cuarzo como mineral principal que constituye los granos de las areniscas. Moreno (2006) obtuvo resultados positivos al caracterizar, a escala de laboratorio, áridos reciclados silicios, con 30 N/mm² (MPa) y más de 35 N/mm² (MPa), resultados que se corresponden con la silicificación residual ocasionada por los procesos metalogénicos que afectaron a las rocas de la región donde se encuentra el área de estudio.

Sánchez de la Torre (2006), de la misma manera, hablaba de la naturaleza preferencial de las rocas silíceas para la extracción de balasto, aunque se refiere a rocas de origen ígneo y metamórfico.

La primera información conocida sobre el uso de las areniscas que se localizan en el noroeste de la provincia de Pinar del Río, similares a las que se vinculan al yacimiento Castellano y pertenecientes a la Formación San Cayetano de edad Jurásico Inferior-

Superior (J_1 - J_3^2), descrita por primera vez por De Golyer, 1918 (Pszcolkowski *et al.*, 1987), fue obtenida por la población local, la cual utilizó las areniscas con diversos fines en la construcción de viviendas (diferentes tipos de morteros y material de relleno).

Vologdin *et al.* (1977) propuso oficialmente el uso de las areniscas del yacimiento Castellano como material a utilizar durante la construcción de las instalaciones de las obras requeridas para la puesta en funcionamiento de la futura mina homónima, para cascajo-rellano del hormigón y del material para el pavimento, haciendo referencia a los elevados valores mínimos y máximos de resistencia a la compresión (87,7 MPa y 110,2 MPa), respectivamente, obtenidos durante los ensayos de este parámetro en el laboratorio; sólo que sin especificar si las areniscas evaluadas eran frescas (por debajo del nivel del intemperismo) o intemperizadas, como las que se refieren en esta investigación; puesto que descartó las rocas coherentes y blandas de la corteza de intemperismo y las definió como de baja resistencia a la compresión ($<7,85$ MPa) e hizo alusión a los valores elevados de resistencia a la compresión, en clara indicación a las areniscas y cuarcito-areniscas no intemperizadas denominadas por él como rocas duras y semiduras del paquete infrayacente de la mineralización. No obstante, este autor no realizó pruebas de uso para áridos a ninguna de las rocas mencionadas.

En los primeros años de la década de los 90, estas areniscas también fue utilizada como capa base en la construcción de una parte del pedraplén que unió a la costa de la zona de Santa Lucía con Cayo Jutía (información no confirmada) puesto que no se conocen los datos oficiales relacionados con las características de estas areniscas para ese uso.

Durante el desarrollo de los trabajos, la elaboración y la evaluación de los resultados de esta investigación se utilizó como referencia, en lo concerniente a los parámetros fundamentales de valoración del material estudiado, la NC-251: 2005. Esa fue una de las razones por la cual no siempre se utilizó la NC-251, pero más reciente (2013).

El Grupo “Hormigón Reciclado”. Comisión Permanente del Hormigón. Comisión de Materiales de ACHE (2002), aunque refiriéndose al árido reciclado, recoge que se deben cumplir las mismas especificaciones que el árido natural en cuanto al contenido de cloruros, contenido de sulfatos, contenido de partículas de bajo peso específico y contenido de

partículas blandas. Estos aspectos analizados, indudablemente favorecen el potencial de uso de una materia prima estrechamente vinculada con mineralización sulfurosa.

Teniendo en cuenta la NC-161: 2002, las areniscas por su composición química y sus propiedades físicas (dureza, estabilidad, etc.) sugirieron su posibilidad de ser utilizada como base y sub-base para relleno de viales.

Otros elementos que justifican las acciones dirigidas a evaluar desde una perspectiva productiva el beneficio ambiental de las areniscas estudiadas en este trabajo constan en la Ley No. 76 "Ley de Minas", la cual en el Capítulo I "Objetivos y Alcance de la Ley", define los siguientes conceptos:

Escombreras: Conjunto de sobrantes originados como consecuencia del laboreo minero que será aprovechable con el desarrollo de una tecnología consecuente.

Roca de Caja o de Destape: Material rocoso y estéril que forma parte del yacimiento y que obstaculiza la extracción del mineral, por lo que en ocasiones tiene que ser removido.

Los conceptos anteriores hacen posible la ubicación y el destino de las areniscas intemperizadas presentes en el yacimiento Castellano, al formar parte del paquete de rocas del yacente de la mineralización y, por ende, formarán parte del destape y los escombros, durante la explotación de las menas piritó-polimetálicas que conforman los cuerpos meníferos principales de este yacimiento.

En su Capítulo VII "De las Obligaciones de los Concesionarios", Sección Segunda "De las Obligaciones Generales", Artículo 41, inciso c, se precisa la obligatoriedad del concesionario con la preservación adecuada del medio ambiente y la economía en el área concesionada al expresar: "preservar adecuadamente el medio ambiente y las condiciones económicas del área objeto de la concesión, elaborando estudios de impacto ambiental y planes para prevenir, mitigar, controlar, rehabilitar y compensar dicho impacto derivado de sus actividades, tanto en dicha área como en las áreas y ecosistemas vinculados a aquellos que puedan ser afectados".

La Ley 81 "Del Medio Ambiente", del 11 de julio de 1997, instrumento jurídico que refleja de modo más adecuado las exigencias de la protección del medio ambiente y la consecución del desarrollo sostenible, en el Capítulo II "Conceptos Básicos" de la Ley 81,

señala de manera más explícita, la estrecha relación entre el uso de una materia prima, vinculado a las necesidades económicas de un territorio y la preservación del medio ambiente. Martín *et al.* (2006) plantearon que la Ley 16/2002, que traslada a la legislación española la Directiva 96/61/CE del Consejo Europeo, tiene por objeto evitar, reducir y controlar la contaminación de la atmósfera, el agua y del suelo, mediante el establecimiento de un sistema de prevención y control integrados de la contaminación, con el fin de alcanzar una elevada protección del medio ambiente en su conjunto.

Esta legalidad foránea vino a coadyuvar, confrontar y enriquecer la experiencia nacional en temas de derecho ambiental.

Mateo (2000), al definir el término de gestión ambiental como propósito de garantizar, sobre la base de los principios y directrices acordados previamente en el proceso de planificación, la adecuación de los medios de explotación de los recursos naturales, económicos y socio-culturales a las propiedades de los sistemas ambientales, establece un antecedente metodológico y práctico para el manejo de la materia prima estudiada.

Reyes (2002), aplicando la filosofía de “más vale prevenir que curar”, se refiere a cómo motivar a las empresas a estudiar su proceso productivo desde una nueva perspectiva, teniendo en mente “como ganar dinero o evitar perder dinero ahorrando materias primas, recursos naturales y energía, minimizando residuos y protegiendo el Medio Ambiente”, proponiéndose como objetivo específico minimizar y aprovechar los residuos.

Jaula (2007) define el Medio Ambiente desde una visión integradora al plantear que es “el sistema que integra la totalidad de los elementos abióticos, bióticos y socioeconómicos, mediante relaciones multidimensionales, diversas y complejas, en estado continuo de cambio, donde se produce una relación dialéctica entre la sociedad y la naturaleza”.

Casas (2001) plantea que hoy día se reconoce que se está ante un problema a escala planetaria y resultante de interacciones y transformaciones de todo tipo y de los cambios en las relaciones de la humanidad y su entorno.

Dubourdieu (2006) asegura que muchas empresas han interiorizado el concepto de desarrollo sostenible, el cual, si bien nace de la preocupación medioambiental, no se limita

a la protección de la Naturaleza sino que establece un marco de equilibrio entre las dimensiones ambientales, económicas y sociales.

I.4. Conclusiones parciales del capítulo.

Como se revela en la literatura consultada durante este trabajo, las areniscas se emplean mundialmente como material de construcción. Sin embargo, en la literatura nacional se desconoce que estas rocas hayan sido utilizadas para áridos, aunque se supo que la población local la emplea, de alguna forma, en la fabricación de viviendas y que fue propuesta la construcción de las obras del Proyecto Polimetálico Castellano.

Desde el punto de vista medioambiental, están reflejadas en este capítulo los instrumentos legales que rigen el tema en nuestro país, como La Ley No. 76 "Ley de Minas" y La Ley 81 "Del Medio Ambiente", alguna otra referencia internacional sobre el asunto y un grupo de definiciones e interpretaciones, abordadas por autores nacionales e internacionales, sobre términos tan complejos e urgentes para la humanidad como Medio Ambiente, desarrollo sostenible, gestión ambiental e impacto ambiental, todos concebidos desde una posición integradora.

Capítulo II. Características físico-geográficas y geológicas del área de estudio.

El objetivo de este capítulo consiste en la evaluación de las características físico-geográficas y geológicas del área de estudio, como contexto interrelacionado con el yacimiento pirito-polimetálico Castellano, desde una visión de los elementos regionales más cercanos de las rocas (areniscas) estudiadas sobre las condiciones locales establecidas por la posición geológica y espacial de estas rocas.

II.1. Características físico-geográficas.

El área estudiada está ubicada dentro de los límites de la superficie sureste del yacimiento pirito-polimetálico Castellano, el cual se encuentra situado en la parte noroccidental de la provincia de Pinar del Río, a unos 3,5 km al suroeste del puerto de Santa Lucía. Administrativamente, pertenece al municipio Minas Matahambre (figura II.1).

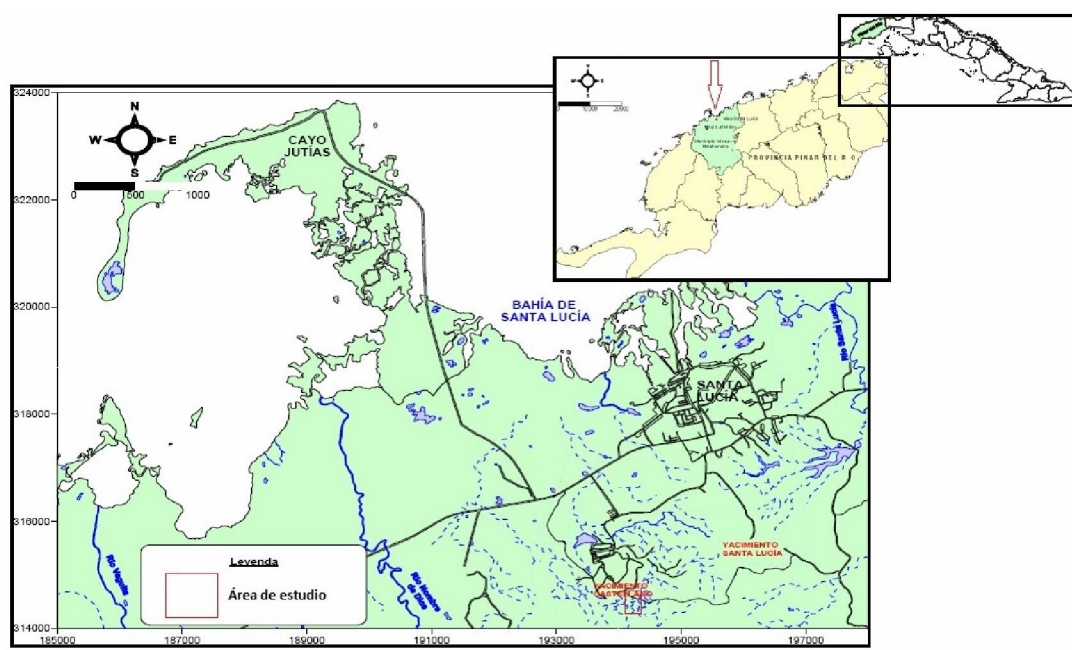


Figura II.1. Ubicación geográfica del área de estudio.

Se localiza en la plancheta topográfica 1: 50000 "Minas de Matahambre" (Hoja 3483-IV), limitada por las coordenadas Lambert (Sistema Cuba Norte) que se indican a continuación:

Vértice	Este	Oeste
1	194100	315000
2	194100	315200
3	194350	315200
4	194350	315000

El área de estudio se encuentra en una región de relieve montañoso bajo y muy desmembrado. Pertenecce a una cadena aislada extendida de suroeste a noreste en una extensión de 1,5 km. La altura absoluta de la cima más alta alcanza 130,0 m. Las elevaciones relativas oscilan entre 80,0-100,0 m. Las pendientes septentrionales de la colina se caracterizan por el carácter aplanado de los valles de los arroyos y la situación de las corrientes temporales y las pendientes meridionales son abruptas, a veces, escarpadas. La colina anteriormente mencionada es parte integrante de una cadena montañosa que se extiende por todo el litoral noroeste, desde el Río Malas Aguas hasta el yacimiento Hierro Mantua, en la zona del pueblo de Dimas, perteneciente a la Sierra de los Órganos; representa un sistema de crestas bajas que se extienden con una dirección Noreste (35°-45°), con crestas laterales bien contorneadas con rumbo Noreste- Suroeste. Los parteaguas son estrechos, en ocasiones con cimas agudas. Los valores de las cotas absolutas son relativamente pequeños (50-256,0 m), coincidiendo las cotas más altas con la Loma Rogelio (256,0 m) y Matahambre (243,0 m).

Dentro de los límites de la región, además del yacimiento Castellano, están el yacimiento Santa Lucía y las manifestaciones Este, Sur, Oeste, Baritina, La Esperanza (Suizo), Anomalía (Jíbaro), etc., los cuales constituyen la mineralización fundamental (sulfurosa Pb-Zn-Cu) del Campo Mineral Santa Lucía-Castellano. Otros depósitos como el yacimiento cuprífero Matahambre, pirito-polimetálico Mella y Nieves, representan la mineralización más importante del campo mineral Matahambre-Mella-Nieves. Los yacimientos

Matahambre y Mella, ya fueron explotados; las operaciones del primero cesaron en 1997, por agotamiento de las reservas rentables y el segundo, se abandonó en 1978 por un accidente, provocado por la autocombustión de la pirita.

Las cimas y pendientes de las lomas están cubiertas por bosques de pinos; en algunas áreas, por eucaliptos y otros bosques foliáceos. En las áreas no antrópicas de los valles Limonar y la Yuquilla crecen los arbustos tropicales típicos; en las hendiduras estrechas y los valles con arroyos poco profundos crecen también los arbustos espinosos.

La red fluvial del área en cuestión y sus inmediaciones es bastante cerrada y desarrollada, de forma dendrítica; se alimenta, fundamentalmente, durante las precipitaciones, mientras que en el período de sequía desaparece casi completamente, con excepción del río Matahambre (La Peña), Malas Aguas, Nombre de Dios Santa Lucía, Pan de Azúcar y los arroyos Minas, Mella y La Yuquilla.

El clima es subtropical húmedo con dos estaciones claramente definidas: La seca (invierno), de noviembre a abril y la lluviosa (verano), de mayo a octubre, la temperatura media anual es de 25,5 °C. Los extremos de calor y humedad relativa durante el verano, durante el verano tienen un promedio de 27 °C y 80 %, respectivamente, son provocados por los vientos dominantes del noroeste. Las precipitaciones medias anuales son de 1320,0 mm (Encarta, 2009).

La precipitación media anual en la zona de estudio es de 1350-1450 mm (CESIGMA S. A, 2007).

Klinchuk *et al.* (1999) describieron los valores de precipitación durante la época lluviosa en 1406,74 mm, donde el caudal de las principales corrientes superficiales llega a tener valores de 0,125-98.5 L/s, mientras que durante la época de sequía las precipitaciones alcanzan como promedio los 448 mm y los caudales son de 0,78-73,44 L/s, en este período la alimentación es prácticamente subterránea.

La provincia de Pinar del Río suele ser azotada por ciclones (huracanes) tropicales, como el Alberto (1982), afectó esta región, con precipitaciones de 200-300 mm en 24 horas. Los más recientes como el huracán Gilberto (1988), el mayor del siglo XX en el hemisferio norte, con vientos en ráfagas que alcanzaron los 350 km/h, el Match (1998) que llegó a las

costas de América Central y azotó a esa región con vientos de 250 km/h; el huracán Katrina (2005), que llegó a los Estados Unidos con vientos de hasta 280 km/h. La región noroccidental de la provincia no está exenta de los embates de este fenómeno atmosférico. La red de caminos está bastante desarrollada y, prácticamente, cualquier punto de la región es accesible para transporte automotor. El yacimiento se une con las cabeceras, municipal (Minas de Matahambre) y provincial (Ciudad de Pinar del Río).

La economía de la región fue deprimida durante el período especial, sobre todo con el cierre de la mina Matahambre (1977) y, finalmente, el cese de la producción de oro de las menas oxidadas del yacimiento Castellano (2008). Siendo durante todos estos años la economía fundamental en el territorio la Industria forestal, el tabaco, los cultivos menores y los servicios.

Con la creación de la Empresa EMINCAR S.A. (2012) con el objetivo de extraer las menas del yacimiento Castellano para obtener concentrados de Pb-Zn, se potenciará el quehacer económico de la región.

II.2. Características geológicas.

Geológicamente el área de estudio está ubicada en el Campo Mineral Santa Lucía-Castellano, el cual se sitúa en el Terreno Cubano Sudoccidental Guaniguanico (secuencia los Órganos), unidad continental del cinturón plegado, uno de los dos principales elementos estructurales que se encuentran conformando a la isla de Cuba (Iturralde-Vinent, 1994). El terreno Guaniguanico incluye las zonas estructuro-faciales Guaniguanico y La Esperanza (Pszczółkowski, 1982). El área de estudio se vincula a la Zona Estructuro-Facial Guaniguanico.

Desde el punto de vista litológico-estratigráfico predominan en esta área los sedimentos terrígenos típicos y sedimentos terrígeno-carbonatados de origen deltaico, existiendo un marcado predominio en el corte de las formaciones terrígenas del Jurásico Inferior-Medio y Jurásico Superior, el cual fue incluido por Astajov y Soknin (1985) dentro de lo que llamó “Serie Pinar”. El yacimiento de areniscas y recebo Castellanos se asocia a los sedimentos

terrágenos de la parte inferior de la Formación San Cayetano (Miembro indiferenciado, J₁₋₂ sc).

En la figura II.2 se muestra el mapa geológico de la región elaborado por Bárzana (1988), donde se aprecia el predominio de las secuencias rocosas de la Formación San Cayetano y la estructura geológica regional.

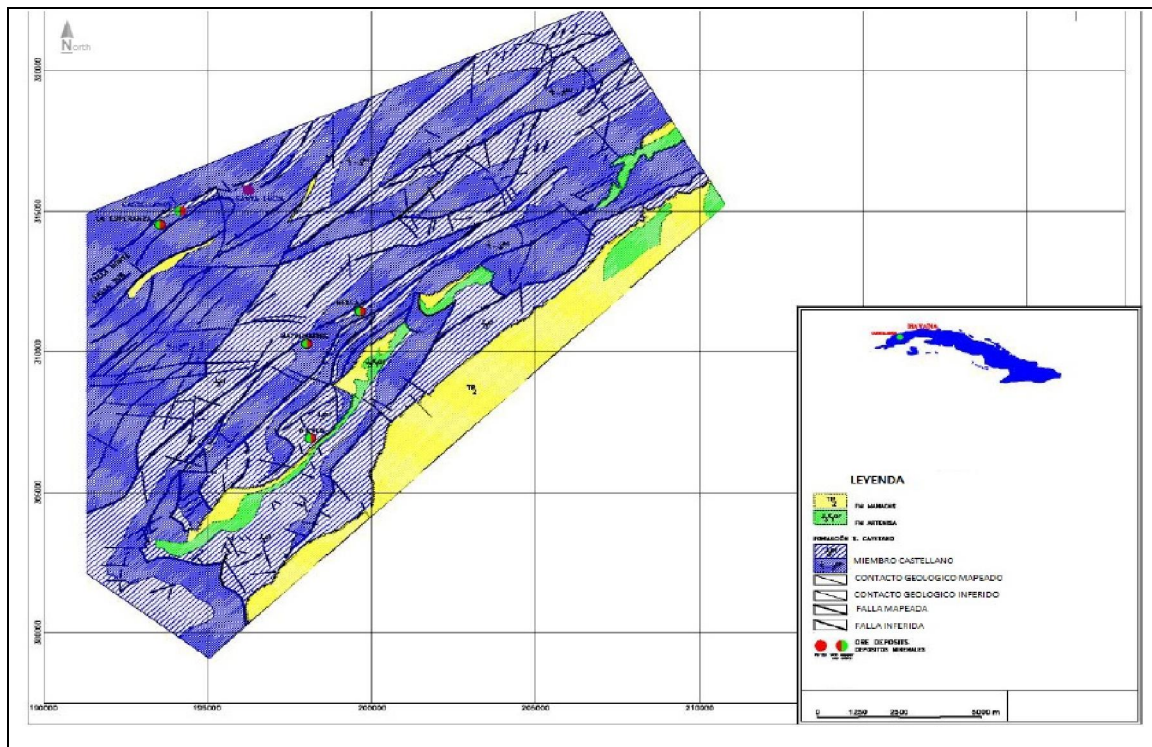


Figura II.2. Mapa geológico de la región con el esquema tectónico ideado por Bárzana (1988).

II.2.1. Estratigrafía.

La estratigrafía de la región está constituida por varias unidades litoestratigráficas, pero en este trabajo se puntualizará la vinculada directamente al objeto de estudio (Formación San Cayetano) y a los que no parecen tener vínculo genético, pero, están más próximas al área de interés y, por ende, a las rocas estudiadas.

Secuencia Los Órganos (Los Organos Belt)

- Formación Manacas (P_2^1 mn): Se vincula a los planos de las fallas de sobrecorrimento principales. Está compuesta de una secuencia caótica, formada por limolitas (aleurolitas) brechosas y cataclásticas, areniscas, argilitas y areniscas tobáceas, que contienen grandes bloques de calizas, así como fragmentos de rocas magmáticas y tufogénicas. Las rocas magmáticas están representadas por serpentinitas y gabros. Su espesor máximo puede aproximarse a los 200,0 m.
- Formación Esperanza ($J_3^1 - K_2$ es): Forma una faja a lo largo del litoral, en la parte más septentrional del área, está constituida por esquistos carbonoso-arcillosos carbonatados, calizas de color gris oscuro, raras veces areniscas cuarzo-feldespáticas y limolitas. Su potencia sobrepasa los 200,0 m. Contacta tectónicamente sobre la Formación San Cayetano.
- Formación San Cayetano ($J_1-J_3^2$): Subyace inmediatamente en contacto tectónico a la formación Esperanza. Tiene un carácter terrígeno y terrígeno-carbonatado. Está formada por areniscas cuarzo-feldespáticas, limolitas (aleurolitas), y esquistos arcilloso- carbonosos con lentes de calizas en su parte superior (Miembro Castellanos, J_3 ct), donde predomina la secuencia pelítica. Las areniscas predominan en su parte inferior (Miembro indiferenciado, J_{1-2} sc). En esta formación se desarrollan la gran mayoría de los yacimientos y manifestaciones minerales del área; vinculada, por ende, genética y espacialmente con la mineralización sulfurosa. Se distribuye por la mayor parte del área en forma de bandas con dirección Noroeste (Figura II.2). Las bandas se producen debido a la alternancia de sus dos miembros entre sí. Su espesor alcanza los 1500,0 m.

Secuencia Rosario Norte (Rosario Norte Belt)

- Formación Artemisa (J_3-K_1 ar): Aunque como una unidad litoestratigráfica de la secuencia Rosario, se considera por la mayoría de los investigadores sobrecorriendo a las unidades de la secuencia Los Órganos; sin embargo, esta fue mapeada, al noroeste de Viñales, subyaciendo discordantemente a las rocas de las formaciones San Cayetano y Manacas, aunque por su relación espacial con las rocas de esta última formación, en el lugar mencionado estas rocas posiblemente constituyan olistoplasmas constituyentes de la Formación Manacas (Cuni *et al.*, 1988). Se compone

de calizas micríticas bien estratificadas de color gris y gris-negro y lentes de silicitas. Se localiza en la parte sur del área y no se le conoce vínculo con la mineralización estudiada. Esta formación puede alcanzar hasta 800 m de espesor; no obstante, en el área de estudio se desconoce su potencia real.

II.2.2. Magmatismo

Las rocas magmáticas en el área de estudio están representadas por serpentinitas, gabros, diabasas, basaltos y sus efusivos. Aunque no están vinculadas directamente con los procesos magmáticos, se localizan areniscas y limolitas (aleurolitas) vulcanomícticas, que conjuntamente con las rocas magmáticas se encuentran formando bloques y fragmentos dentro de la Formación Manacas, lo cual refleja claramente la relación de estas rocas con las líneas que definen importantes fallas de sobrecorrimentos. El vínculo genético entre el magmatismo y la mineralización sulfurosa no se ha podido establecer en la actualidad.

II.2.3. Tectónica

De acuerdo con el esquema tectónico planteado por Vinent (1994) en la región noroccidental de la provincia de Pinar del Río están presentes los dos elementos principales que forman la estructura geológica de la República de Cuba: el cinturón plegado y el neoaútóctono. Pero, en esencia, son las unidades continentales del cinturón plegado caracterizadas por el terreno de Guaniguanico, del Jurásico Inferior al Oxfordiano quienes cubren la mayor cantidad del área de esta región. El neoaútóctono tiene su presencia también aquí con sedimentos del Reciente, cubriendo discordantemente al cinturón plegado.

El terreno de Guaniguanico (incluye las zonas estructuro-faciales Guaniguanico y La Esperanza (Pszczółkowski, 1982). Presenta una litoestratigrafía muy complicada con diferentes tipos de secciones mezcladas juntas, fuertemente deformadas y metamorfizadas. Las rocas más ampliamente difundidas son los depósitos de margen continental del Mesozoico.

La influencia de los movimientos tectónicos dentro de los límites del área estudiada, se relaciona con eventos que afectaron la región noroeste de la Provincia Pinar del Río en el pasado geológico (Jurásico Superior - Eoceno), destacando un marcado desarrollo de estructuras plicativas y disyuntivas. Ello propició el esquema estructural actual.

- **Tectónica plicativa.**

Se destacan, principalmente, las siguientes estructuras:

- a) Pliegues asociados al arrastre de las fallas longitudinales, dentro de los cuales tenemos a Nieves-Loma Mineral en la zona de Minas de Matahambre y algunos de menor desarrollo relacionados con los sistemas de fallas de menor desplazamiento como Manacas y Ruiseñor, en la misma localidad.
- b) Pliegues asociados a las fallas transversales compresivas, dentro de los cuales, los que más se destacan, son los relacionados con las fallas Alfa y Beta, también en la localidad de Minas de Matahambre.

- **Tectónica disyuntiva.**

Este proceso afectó considerablemente las rocas presentes en la región. Se manifiesta por la presencia de fallas profundas, fallas longitudinales grandes y sobrecorrimientos y fallas pequeñas asociadas a las anteriores, cuya dirección concuerda con el rumbo general de las estructuras plegadas; así como dislocaciones transversales a las estructuras.

A las fallas grandes y de sobrecorrimiento pertenece la falla Limonar-Bejuquera, que constituye el piso de los yacimientos Nieves y Loma Mineral, la falla Laguna en la zona del yacimiento Matahambre y las fallas Norte y Sur del yacimiento Castellano.

La dislocación de carácter transversal de mayor amplitud pasa por el yacimiento Matahambre.

Las fallas han jugado un doble papel por su relación genética, tanto con la mineralización endógena como con la exógena, ya que estas, además de constituir vías de acceso de las soluciones magmáticas mineralizadas, propiciaron el desarrollo de las zonas de oxidación, influyendo en el aumento de la porosidad de las rocas con la formación de grietas,

fragmentos y bloques de diferentes proporciones, como consecuencia de la destrucción de las masas de rocas y menas. La contribución de las mismas a la acumulación del oro y la plata están en dependencia de la presencia de estos metales en los menas y las rocas.

Para una mejor comprensión del esquema tectónico actual en el área de estudio y su relación con la mineralización principal, se propone el modelo estructural planteado por Bárzana (1988). Este considera que, partiendo de la relación espacial y genética de la mineralización con las rocas de caja (hospederas), así como la composición mineralógica de los diferentes yacimientos y manifestaciones y teniendo en cuenta los escamamientos ocurridos producto del deslizamiento o sobrecorrimento de los esquistos, provocados por los esfuerzos horizontales sobre las areniscas consideradas las rocas de mayor competencia frente a esos empujes, pudo delimitar los contornos de sobrecorrimentos imposible de identificar mediante otros criterios. Él observó que cuando la mineralización era predominantemente cuprífera, las rocas encajantes u hospederas eran las areniscas; mientras que cuando predominaba la mineralización pirítica o pirito-polimetálica, la roca hospedera de esa mineralización eran los esquistos. Esto reveló un sistema de bandas de areniscas y limolitas (aleurolitas) alternantes, imbricadas, de buzamiento noroeste, concordantes con el rumbo de la estructura general de las unidades rocosas. De esta manera dio una nueva morfología al esquema tectónico de la región (figura II.2) permitiendo establecer un nuevo criterio tanto para el mapeo litológico como para la localización de nuevos yacimientos minerales en la zona.

II.2.4. Metamorfismo

En general, las rocas de la región fueron sometidas a un metamorfismo de bajo a muy bajo grado de temperatura y, probablemente, las altas presiones originadas durante el metamorfismo regional a que fueron sometidas estas rocas se minimizaron debido a las facilidad de ruptura de los estratos, como resultado de las propiedades físicas de las rocas, lo cual propició los desplazamiento de las diferentes bandas que hoy configuran la morfología tectono-estructural de las secuencias rocosas.

Las transformaciones más sustanciales del metamorfismo regional, está vinculada con la catagénesis y la metagénesis de las rocas carbonatadas y silíceas y la recristalización del cemento en las areniscas y las limolitas con la formación de minerales arcillo-hidromicácicos, claritas y carbonatos (Lovanov *et al.*, 1975). Estas características de, cierta manera, han tenido influencia en las propiedades físico-mecánicas de las rocas estudiadas.

II.3. Geología del yacimiento pirito-polimetálico Castellano.

II.3.1. Litología

El depósito estratiforme pirito-polimetálico de Pb y Zn tiene una longitud por el rumbo de más de 800,0 m y cerca de 250,0 a 350,0 m por el buzamiento. El rumbo es de 65° con un buzamiento hacia el noroeste de 50°. El espesor del depósito varía de 1,0-70,0 m, con un promedio de 18,0 m.

La clasificación litológica se basó en la posición del cuerpo mineral y las unidades estratigráficas que rodean el área mineralizada:

Areniscas del yacente (AY): Se encuentran debajo del área mineralizada y consiste de un paquete de areniscas silicificadas y en menor cuantía intercalaciones de limolitas y pizarras. Las areniscas representan cerca del 70 % del total, con alteraciones principales de silicificación, piritización, cloritización y sericitización. Cuando estamos en presencia de los canales de acceso de la mineralización principal (zonas de stockwork), ésta consiste de pirita y calcopirita en forma de vetillas entrecruzadas.

Pizarras del yacente (PY): Yacen concordantemente sobre las areniscas, estando interdigitadas también con la mineralización polimetálica. Ellas son carbonáceas, de ahí el nombre de pizarras negras, algunas veces calcáreas con pirita diseminada. Son comunes las intercalaciones de limolitas, dolomitas y calizas. Las pizarras forman alrededor del 80 % al 90 % del paquete. El contacto entre las rocas de caja y la mineralización es siempre estratigráfico.

Pizarras del pendiente (PP): Son similares a las pizarras del yacente, con la excepción que la cantidad de pirita dentro de las pizarras es menor. El contacto con la mineralización polimetálica es también estratigráfico. Las pizarras negras y la caliza y dolomita asociada

ocurren como rocas de caja y están interdigitadas como lentes con la zona principal de la mineralización. Aunque no está probado, probablemente se puedan encontrar bolsones de pizarras dentro de la mineralización.

Areniscas del pendiente (AP): Son similares a las encontradas en el yacente; se considera que estas sean de la misma unidad litológica aunque se encuentren en diferente nivel estructural. Ellas están separadas de las pizarras del pendiente por una falla de sobrecorrimento, la Falla Norte, la cual ha repetido la secuencia estratigráfica.

Zona de Brecha Explosiva (ZB): Puede tener hasta 60.0 m de espesor. Vinculada a la estructura principal que afecta al yacimiento, la falla de sobrecorrimento situada en su parte norte, Falla Norte. En esta zona fueron identificadas las siguientes rocas: calizas, dolomitas, areniscas, serpentinitas, gabro-diabasas, porfiritas andesíticas, microdiabasas y rocas anfibolitizadas.

II.3.2. Magmatismo.

Se encuentra relacionado con las grandes fallas de sobrecorrimento, representado por rocas volcánicas máficas y ultramáficas. No se ha encontrado vínculo alguno entre el magmatismo y la metalogenia.

II.3.3. Mineralogía.

Los minerales dominantes son la pirita y en menor ocurrencia la esfalerita; la galena es inferior. Como minerales acompañantes se encuentran la pirrotina, marcasita, melnicovita-pirita y calcopirita. Se reportan como trazas la arsenopirita, magnetita y bornita.

La mineralización fue dividida en dos tipos principales: una masiva, la cual ha sido definida geológicamente como MPOL y otra diseminada como DISPOL. En menor grado hay una ocurrencia de pirita masiva dentro del depósito y una mineralización de stockwork con contenidos de cobre en el yacente del cuerpo mineral polimetálico. El mineral masivo MPOL (mena 2) representa la parte original in situ del depósito. Esto ha sido definido por apariencia visual dentro del testigo y coincide con contenidos mayores a 20 % de azufre. El mineral diseminado DISPOL (mena 1) es generalmente de mas bajo contenido y puede

estar subdividido en mineral brechado (mena brechosa) la cual fue hidrotermalmente brechada durante o subsiguiente a la deposición, proceso que redujo su contenido de metal. Los minerales ganga consisten de barita, siderita, cuarzo, calcita y dolomita.

La mayoría de las vetas argentíferas están relacionadas con la galena, lo que se sustenta por la correlación entre los resultados analíticos de plomo y plata. La fuente primaria del oro no fue detectada, pero se piensa que este podría presentarse como un elemento libre sub-microscópico o dentro del retículo cristalino de la pirita. El oro resultante de los análisis no se correlaciona con ningún otro elemento. Lenhe (1993) describió sulfuros de cobre secundarios presentes en este yacimiento, ellos son: covelina, digenita y calcocita, y fueron observadas en una sola muestra (1002-10) reemplazando a la galena y la esfalerita como resultado de la influencia supergénica.

II.3.4. Tectónica

El depósito está situado entre dos fallas de sobrecorrimiento que se extienden del Noreste al Suroeste, ellas repiten la Formación San Cayetano. La principal falla de sobrecorrimiento que afecta el yacimiento es la Falla Norte, la cual consiste de una estructura horizontal bien desarrollada fácilmente identificable dentro de los testigos de perforación. La roca es esencialmente una milonita con clastos de brecha de serpentinitas, arenisca y limolitas. Esta es discordante con los principales contactos litológicos, cuando se compara con las areniscas y pizarras del contacto del yacente, con un buzamiento que varía desde 25 ° - 60° hacia el noroeste. La zona de falla definida por la brecha puede tener hasta 60.0 m de espesor

La Falla Sur limita el depósito Castellano por el sureste. Esta falla no afecta la mineralización polimetálica, pero bien puede afectar la zona de stockwork y el afloramiento de la Formación San Cayetano. La fase final de la actividad tectónica asociada con el depósito Castellano produjo una serie de fallas de ángulos cruzados inversas y normales, que han fragmentado la zona mineralizada en una serie de bloques.

II.4. Conclusiones parciales del capítulo.

Durante el desarrollo del capítulo se pudieron comprobar los siguientes aspectos:

- La distribución de la roca estudiada se extiende más allá de los límites del yacimiento Castellano.
- Las características de las rocas de interés, ubicadas en la zona de oxidación no mantiene vínculo directo con la mineralización sulfurosa principal del yacimiento Castellano.
- Se establece la posición de las areniscas objeto de estudio en relación con la mineralización Pb-Zn, con lo cual se deduce la cantidad y el carácter como material de destape de estas rocas.
- Existen intercalaciones de limolitas caolinizadas en las areniscas, las cuales pueden ser utilizadas como aditivo en las mezclas de morteros y hormigón.
- Se revela el potencial de las areniscas como parte de la Formación San Cayetano y la distribución de dicha formación en la región.

Capítulo III. Materiales y métodos

Para alcanzar, desde el enfoque científico, los criterios demostrativos que permitan afirmar que el uso del material que se investiga (areniscas intemperizadas) pueda representar un beneficio ambiental a partir de una visión económica propiamente dicha, se requiere de la definición de los métodos y materiales utilizados durante el estudio de caracterización y el proceso creativo. Esto es precisamente la que se pretende alcanzar con el desarrollo de este capítulo.

La experimentación científica requiere de la aplicación de métodos, procedimientos y equipos que, avalen las características y cualidades de los materiales que se estudian como parte del trabajo investigativo. Es por ello que en este capítulo se describen los métodos aplicados en cada caso y como se procedió para la determinación de las variables a evaluar para cada material y mezcla estudiada.

En general, el Método de la Investigación Científica que se usa en el proceso de investigación no es único y la selección del más conveniente para una investigación particular puede estar condicionada por las perspectivas acerca del conocimiento del objeto, es decir, supuesto gnoseológico y lógico (Legrá y Silva, 2010); por esas razones el trabajo se realizó sobre la base de la combinación de métodos empíricos y teóricos (Aróstegui *et al.*, 1978), pues se describen los procesos y metodologías para realizar la investigación, así como se precisan las características y propiedades más importantes de las areniscas cuarzosas intemperizadas como áridos y las mezclas analizadas a partir de ellas, de las cuales se definen las dosificaciones más adecuadas según las aplicaciones estudiadas.

La metodología utilizada tuvo en cuenta las fases desarrolladas durante el proceso de la investigación, las cuales contemplaron seis etapas:

- Recopilación de datos de trabajos anteriores.
- Trabajos de campo.
- Análisis y ensayos de laboratorio
- Pruebas de uso
- Cálculo de recursos

- Valoración de los beneficios ambientales.

Esta metodología y los procedimientos utilizados en la investigación se resumen en la figura III.1.

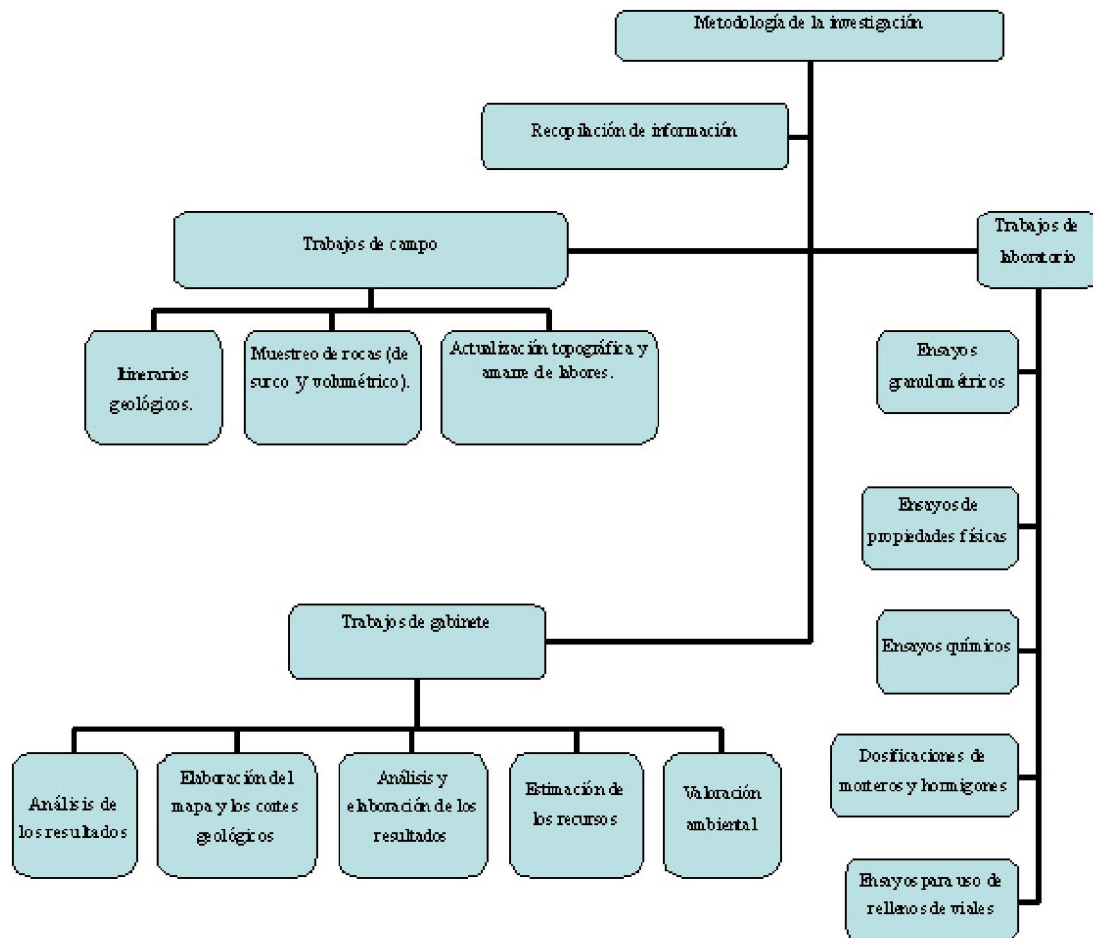


Figura III.1. Diagrama de flujo de la investigación

III.1. Recopilación de datos de trabajos anteriores.

Es conocido (Capítulo I, epígrafe I.3) que la información acerca del uso de las areniscas objeto de estudio como materia prima para la construcción ha sido muy limitada. No obstante, para el proceso de la recopilación de la información se consultaron los informes geológicos existentes de los trabajos regionales y locales, artículos de eventos nacionales e

internacionales y toda la literatura sobre el tema al alcance, lográndose comprender las especificidades del material a evaluar y sus posibilidades reales.

III.2. Trabajos de campo.

Los trabajos de campo estuvieron dirigidos a comprobar las características del material de interés en su yacencia propia durante los itinerarios geológicos, los elementos de yacencia de las capas (buzamiento e inclinación) y de las principales estructuras tectónicas, como las fallas y los pliegues. Con estos fines se proyectaron trabajos topogeodésicos, itinerarios geológicos y muestreo de rocas.

- **Itinerarios geológicos**

Los itinerarios geológicos se previeron para apoyar el mapeo y el muestreo de rocas en el área de la investigación; se basaron en el trazado de líneas topográficas espaciadas a 50,0 m entre ellas, con estacas colocadas a 20 m a lo largo de los perfiles. Para determinar los elementos de yacencia de las rocas y las estructuras tectónicas fundamentales se utilizó una brújula minera Freiberg, de fabricación alemana. Se midieron todos los elementos de yacencia de las rocas en los afloramientos sobre la línea de los perfiles y entre perfiles, prestando especial atención a los afloramientos en los taludes y las cañadas.

- **Trabajos topogeodésicos**

Se realizó la actualización topográfica del área y el amarre de labores (surcos). Se utilizó para estos trabajos un teodolito WILD-T2, DISTOMAT, DI 1600, marca WILD, con precisión ± 1 segundo; para lo cual se tuvo en cuenta el método de selección de los puntos de detalle, basado en las estaciones topográficas de GeoCuba y la Empresa Geominera de Pinar del Río. Estos trabajos se realizaron a escala 1:500.

- **Muestreo de roca**

Para asegurar la caracterización del material evaluado se realizaron los muestreos de surco y volumétrico y se asumieron los ensayos que regularmente realiza el laboratorio de la

Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA). El muestreo de la roca para análisis químico en el yacimiento se realizó mediante surcos continuos ubicados a lo largo de los perfiles separados cada 50,0 m. Los surcos se hicieron, tanto en la superficie horizontal como en la vertical (taludes), con dimensiones de 10,0 cm de ancho, 5,0 cm de profundidad y longitud que osciló entre 2,5 y 10 m (figura III.2).



Figura III.2. Procedimientos utilizados en el muestreo de surco

Se tomaron 18 muestras dentro del área de estudio. Inmediatamente que las muestras fueron tomadas en el campo, se molieron a la granulometría aproximada de 1.0 mm, utilizando un molino de quijada, en el laboratorio de la Unidad Geólogo-Minera de la Empresa Geominera de Pinar del Río, luego fueron homogenizadas y cuarteadas por el método del paleo y del cono, hasta obtener un peso que osciló entre 1,03-1,44 kg para enviarla finalmente al laboratorio químico.

En la tabla III.1 se relacionan las muestras tomadas para el análisis químico con las longitudes y los pesos iniciales y con el que finalmente se envió al laboratorio químico.

Tabla III.1. Relación de muestras para análisis químico.

No.	Perfil	No. de Muestra	Long. (m)	Peso inicial en el campo (kg)	Peso final enviado al laboratorio (kg)
1	P-2	1	6,00	20,00	1,183
2	P-2	2	6,00	25,00	1,440
3	P-2	3	7,00	27,00	1,200
4	P-2	4	2,50	11,00	1,309
5	P-2	4A	2,50	16,50	1,310
6	P-2	5	5,00	35,00	1,286
7	P-1	12	7,00	17,50	1,243
8	P-1	13	10,00	20,50	1,216
9	P-1	14	5,00	10,04	1,264
10	P-1	15	10,00	14,15	1,251
11	P-1	16	10,00	7,00	1,206
12	P-1	17	6,00	12,00	1,269
13	P-3	6	10,00	31,00	1,030
14	P-3	7	10,00	17,00	1,056
15	P-3	8	5,00	11,20	1,251
16	P-3	9	10,00	17,50	1,225
17	P-3	10	10,00	13,50	1,233
18	P-3	11	8,00	15,00	1,200

El muestreo volumétrico se realizó también en el campo con el objetivo de realizar ensayos físico-mecánicos (granulometría), teniendo en cuenta la representatividad de la muestra en el área del macizo estudiado. Se tomaron 2 muestras de pequeño volumen (M-1, 22,77 kg; M-2; 79,90 kg) una a escala de planta piloto (M-3; 3,0 t) y otra de mayor volumen, a escala industrial (M-4; 30,0 t). Las muestras de pequeña escala y de escala de planta piloto se tomaron manualmente (utilizando palas) y la toma de la muestra grande fue mecanizada, utilizándose una retroexcavadora (figura III.3).



Figura III.3. Toma de la muestra (M-4) y colocación en el área de la planta industrial Cantera "La Lata".

III.3. Ensayos y análisis de laboratorio.

III.3.1. Análisis químicos

Para esta investigación, se realizó el análisis químico completo a todas las muestras de surco tomadas en el laboratorio del CIPIMM, La Habana: Mediante estos ensayos químicos se determinaron los contenidos de óxidos siguientes: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , ZrO_2 , FeO , P_2O_5 , SO_3 y P.P.I. (pérdidas por ignición). Para ello fueron utilizados el análisis gravimétrico (SiO_2 , PPI), fotometría de llama (Na_2O y K_2O) y espectrometría de absorción atómica (resto de los óxidos).

Además, se determinaron las impurezas orgánicas, cuyo método se basa en la comparación colorimétrica de la solución obtenida en los ensayos conteniendo las materias orgánicas contenidas en las arenas con una solución patrón de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) en ácido sulfúrico, u otras soluciones como el cloruro férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) en HCl; cloruro de cobalto ($\text{CoCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) en HCl y también con la solución de ácido clorhídrico. Este análisis se basó en las exigencias de la norma (NC-185:2002).

Las impurezas orgánicas son sustancias muy peligrosas que, frecuentemente, se encuentran en los áridos, especialmente en las arenas naturales que están formadas por coloides orgánicos que provienen de la descomposición de la materias orgánica de origen animal o vegetal (NC-54-395: 1987).

Los resultados de las impurezas orgánicas se dan como el número de placa (de la placa 1 a la placa 5) que expresa la coincidencia del color de la solución de la muestra con la solución patrón. El árido no contendrá impureza si su naturaleza o cantidad no excede la placa 3, de manera que no se afecten las propiedades esenciales del mortero (NC-185: 2002).

III.3.2. Ensayos de propiedades físicas

Estos ensayos fueron realizados teniendo en cuenta las exigencias de las normas cubanas elaboradas para cada parámetro. A continuación se describe la metodología utilizada para la determinación de las propiedades físicas fundamentales: granulometría, peso específico y absorción.

- **Ensayo granulométrico.**

En el estudio de la composición granulométrica de las areniscas intemperizadas del yacimiento Castellano se tuvieron en cuenta los aspectos siguientes de la roca: las condiciones petrográficas y mineralógicas, la composición química, el comportamiento general en el macizo y la influencia de las condiciones antrópicas. De ahí parte la metodología utilizada para los ensayos, tanto a escala de laboratorio como a escala de planta piloto; diferenciándose así la fracción gruesa cuarcitizada de la fracción fina derivada de la meteorización de los feldespatos o los efectos de las soluciones hidrotermales (caolinización) en la propia arenisca, así como las intercalaciones de limolita existentes en el área de investigación.

El procedimiento aplicado utilizó tamices de agujeros cuadrados, incluyendo la determinación de la fracción fina, por debajo del tamiz de 75 μm o No. 200 (tamiz 0,074 mm):

Todas las muestras tomadas, tanto las de pequeño volumen (M-1; 22,77 kg; M-2; 79,90 kg), la de escala de planta piloto (M-3; 3,0 t) y la de escala industrial (M-4; 30,0 t) tuvieron como destino final el laboratorio de ensayos de la ENIA en Pinar del Río, aunque las dos

últimas se molieron en las instalaciones de la Unidad Geólogo-Minera de la Empresa Geominera de Pinar del Río y la cantera La Lata de Pons, respectivamente.

La muestra que se tomó a escala de planta piloto también se clasificó inicialmente en las instalaciones de la Unidad Geólogo-Minera.

La muestra M-3, a partir de los resultados obtenidos en esos análisis, sirvió para conformar y definir la metodología apropiada de acuerdo con las características propias del material evaluado, consistente en una clasificación inicial, trituración con un molino de quijada y clasificación final (figura III.4).

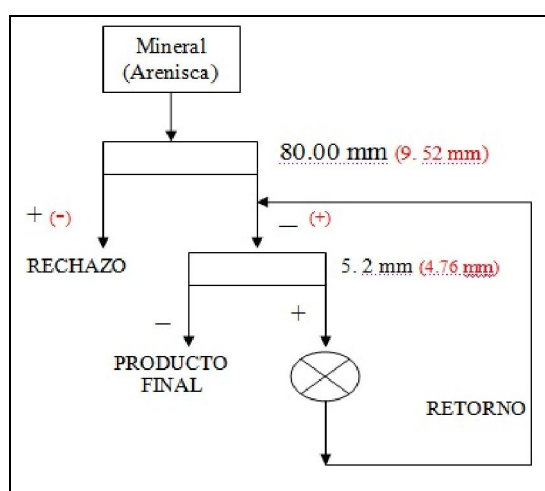


Figura III.4. Esquema de la planta de trituración.

La clasificación inicial a la muestra de 3,0 t se hizo con una zaranda de barrote con abertura de 80,00 mm, con el propósito de separar la fracción no asimilable por el molino. El material pasado por 80,00 mm fue triturado y cribado por el tamiz 4,76 mm. El material retenido en el tamiz 4,76 mm fue remolido y, finalmente, se tomó una muestra del material pasado por el tamiz 4,76 mm (Muestra PP-1-1) y otra muestra del material retenido sobre ese mismo tamiz después de remolido (PP-1-2), clasificándose posteriormente ambas muestras (PP-1 y PP-2) en el laboratorio de la ENIA por los tamices de aberturas 9,52; 4,56; 2,38; 1,19; 0,59; 0,297 y 0,149. Estos trabajos se realizaron siguiendo las normas (NC-251, NC-175 y NC, 178).

Las areniscas que conformaron la muestra (M-4), desafortunadamente, se molieron directamente, sin considerar la metodología definida en la figura III.4. Después de la trituración total del material se tomaron tres muestras representativas de la misma, con un volumen aproximado de 50 kg por cada muestra, caracterizando los intervalos de las fracciones 5,0-0,150 mm, 6,0-13,0 mm y 19,0-13,0 mm. Estas tres muestras fueron las utilizadas para los ensayos de laboratorio.

- **Determinación de peso específico y absorción.**

Estos análisis se realizaron a las muestras en el laboratorio, conforme a las normas (NC-186: 2002; NC-187: 2002). Entre los parámetros a determinar se destacan: peso específico corriente (PEC), peso específico saturado (PES), peso específico aparente (PEA) y absorción.

La absorción de los áridos se determina por el método establecido en las referidas normas cubanas; pero, en este caso para determinar la absorción efectiva, se toma un tiempo máximo de saturación de 30 minutos (para áridos de hormigones de densidad normal).

El procedimiento de cálculo para estos parámetros se muestra en el Capítulo I (sub-epígrafes I.2.3 y I.2.4).

- **Determinación de peso volumétrico**

Se determinó por medio de pesadas del material contenido en recipientes, calibrados de volumen conocido, según la Norma Cubana (NC-181: 2002). Según esa norma se determinará el peso neto del árido contenido en el recipiente, luego se obtendrá el peso volumétrico (suelto o compactado) multiplicando el peso neto por un factor de calibración (expresando el resultado en kg/m^3).

III.4. Pruebas de uso

Las pruebas de uso incluyen: materiales que conforman las aplicaciones, muestreo del cemento, preparación de probetas y diseño de mezclas.

III.4.1. Materiales que conforman las aplicaciones.

Es importante conocer cada material y sus características, para poder definir la aplicación y las proporciones que tendrán en los morteros, hormigones (grava, gravillas, arena), rellenos de vías, etc.

A continuación se hará una breve caracterización de los materiales alternativos que se manifiestan en la región y a los que se les puede dar diferentes usos:

A. Árido.

Las areniscas cuarzosas intemperizadas del yacimiento Castellano constituyen el árido fundamental a ser estudiado en esta investigación. Estas son de color gris con tonalidades pardo-rojizas y amarillentas, alcanzando tonalidades más claras en horizontes donde se manifiesta la caolinización (figura III.5).



Figura III.5. Areniscas cuarzosas intemperizadas del yacimiento Castellano

Estas son de granulometría fina, aunque en algunos sectores alcanzan granulometría media-gruesa, con intercalaciones y lentes de gravelitas, pizarras y limolitas, subordinadas. Debido a eso la roca adquiere una estratificación paralela bien manifestada en los afloramientos. Frecuentemente en las areniscas se detecta una estratificación oblicua y también brechoza de cosedimentación, en la que se desarrolla mineralización de stockwork hematito-limonítica con mineralización cuprífera supergénica (malaquita, azurita). La

textura de las areniscas y limonitas es psamítica (dimensiones de los granos 0,1–0,2 mm). Los fragmentos están representados preferentemente por granos bien redondeados y clasificados, de cuarzo y raras veces feldespatos. El proceso más intenso de cuarcificación se observa en los sectores de agrietamiento elevado y cerca de las zonas tectónicas, donde toman lugar de forma irregular los cuerpos de cuarcitas o cuarcitas – areniscas, donde a veces se asocia la mineralización de stockwork. Está presente la caolinita, generalmente, reemplazando las rocas originarias de granos arcillosos (lutitas, y limonitas y pizarras) y los granos feldespáticos de las areniscas. Las rocas están bastante fracturadas y fragmentadas, como producto a la meteorización, la tectónica y la actividad antropogénica.

B. Aditivos.

En estos trabajos se utilizaron, como adición en las mezclas de mortero y hormigón, ceniza de tostación oxidada de pirita de la antigua Planta Sulfometales y el recebo de los yacimientos Castellano y Santa Lucía.

La tostación oxidante de la pirita en hornos de soleras múltiples con la inyección de aire conduce a la descomposición de los sulfuros y sulfatos presentes en el mineral; la reacción del oxígeno con el azufre forma dióxido de azufre (SO_2) y trióxido de azufre (SO_3), proceso que ocurre en presencia de pentóxido de divanadio (V_2O_5) que actúa como catalizador. Los sólidos resultantes del proceso piro-metalúrgico fueron extraídos de los hornos y después de disminuirle la temperatura, se depositaron en el patio de la Planta Sulfometales originando un depósito de colas. Esto ha conducido a que sean consideradas un yacimiento artificial, formado durante 40 años, producto al procesamiento de la pirita de los yacimientos Mella y Santa Lucía para la producción de ácido sulfúrico. Este yacimiento, desde el punto de vista medio ambiental, significa un grave problema para el ecosistema costero y la población cercana al lugar, que durante años ha sufrido por la contaminación de los suelos, el agua y el aire (Contrera, 2014).

En la figura III.6 se presentan imágenes de los depósitos 3 y 5 de ceniza de tostación de la pirita, que ocupan una parte importante del área de la antigua Fábrica Patricio Lumumba (Planta Sulfometales).



Figura III.6. Cenizas en el patio de la antigua Planta Sulfometales (Depósito 3, imagen izquierda y Depósito 5, imagen derecha)

El recebo consiste en la caolinita asociada a las areniscas y limolitas existentes en los yacimientos Castellano y Santa Lucía, que cumplen con los requisitos exigidos por la norma. En la figura III.7 se muestran imágenes del material de recebo de los dos yacimientos mencionados.



Figura III.7. Intercalaciones de areniscas y limolitas caolinizadas

C. Cemento

Para los ensayos de dosificación se emplearon los Cemento Portland P- 350 y Cemento PP- 250, producidos en la Fábrica Mártires de Artemisa, los más comunes en el país. Estos fue evaluados siguiendo las orientaciones de la norma (NC 95: 2001 y NC-506: 2013).

D. Agua

Su función es la de humedecer los componentes sólidos de la mezcla, garantiza el mezclado y homogenización de estos y durante el sacado de estas provoca el fraguado del hormigón. En la elaboración de estas mezclas se puede añadir tanto el agua industrial o el agua potable, siempre que se pueda demostrar que le proporciona al mortero las propiedades que se describen y que están plasmadas en la norma (NC-175: 2002).

III.4.2. Muestreo del cemento.

Esto es de suma importancia para evaluar el resultado final de las propiedades que se quieren determinar en los hormigones y morteros, de ahí que se requiera un muestreo exigente y la caracterización precisa de sus propiedades físico-mecánicas y químicas.

El muestreo del cemento se realizó en el laboratorio de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA), asumiendo las normas (NC-95: 2011 y NC-97: 2011).

Los ensayos realizados a los cementos PP-250 y P-350 (de la Fábrica Mártires de Artemisa) consistieron en: peso específico, consistencia normal, Finura Tamiz 170, superficie específica, tiempo de fraguado, resistencia a la compresión a 7 y 28 días y resistencia a la flexo-tracción a los 7 y 28 días.

III.4.3. Diseño de mezclas y dosificaciones.

La metodología aplicada para los diseños de mezclas se basaron en las dosificaciones elaboradas para su uso como morteros de albañilería (para elementos de pared) y hormigones hidráulicos, para lo cual se tuvieron en cuenta las normas (NC-175: 2002, NC-120: 2007 y NC-247: 2010).

- **Procedimiento general.**

Para el diseño de las mezclas se empleó el método tradicional o clásico (de Seidel – Gauss). Mitrofanov *et al.* (1947) plantean que se modifica uno tras otro cada factor hasta determinar el máximo parcial con un valor constante de todos los demás factores, pues el interés no es el de obtener las mezclas óptimas para cada aplicación, sino tan solo aquellas dosificaciones cuyas variables de salida se aproximan a lo deseado.

Sujeto a estos criterios científicos, para la selección de las combinaciones posibles de áridos se utilizó la metodología establecida por el Ministerio de la Construcción “Métodos para la dosificación del concreto”, elaborada por el profesor O’ Reilly (1997), que consiste en:

- El método para dosificar mezclas de hormigón con baja resistencia.
- El método para el diseño de mezclas de hormigón basado en la determinación correcta de las características de los áridos.
 - a) Determinar por el método experimental la relación óptima de la mezcla de arena y árido grueso.
 - b) Determinar la cantidad de agua necesaria para obtener la consistencia requerida de la mezcla de hormigón.
 - c) Determinar la cantidad de cemento.
- El método para dosificar mezclas de hormigón con alta consistencia, que se compactan por vibración.

El cálculo de las dosificaciones se realizó a partir de las combinaciones del árido (las areniscas) propuestas utilizando como herramienta auxiliar el Excel y teniendo en cuenta que:

- Para obras:
 - Grado de control: Bueno (Desviación típica: 3,8 MPa)
 - Tipo de exposición: Media
 - Consistencia: Blanda 80 – 120 mm
- Diseño para un volumen de 1,0 m³

Para la definición de las dosificaciones más adecuadas se empleó el método comparativo.

- **Dosificaciones de mortero para albañilería**

La metodología para mortero consideró, dentro de los usos evaluados, las características principales de la materia prima básica (las areniscas), los cementos a utilizar y los aditivos propuestos. Se le realizó a los tamices: - 4,76 mm, - 2,38 mm, - 1,19 mm y se empleó el método tradicional o clásico de Seidel–Gauss (Mitrofánov *et al.*, 1947) descrito ya anteriormente.

Durante la selección de las dosificaciones las mezclas son elaboradas en la mezcladora de porciones para probetas del laboratorio (figura III.8), y las mezclas de mayor volumen se elaboran manualmente con el empleo de palas.



Figura III.8. Mezcladora

Para las medidas de revestimiento de los morteros de colocación se utilizaron las recomendaciones de la norma (NC-175: 2002), es decir 5-20 mm para pared interior y 20-30 mm para pared exterior.

- **Dosificaciones de mortero para hormigón hidráulico.**

La metodología de las dosificaciones para hormigón hidráulico también consideró los mismos elementos que se tuvieron en cuenta para los morteros de albañilería. Sin embargo, el uso evaluado positivamente fue el del hormigón para la elaboración de bloques de Tipo II (15 cm de espesor), basado en las exigencias de calidad de la norma (NC-247: 2010).

Los ensayos de las dosificaciones se realizaron por el mismo laboratorio de la ENIA. Se les hicieron a las muestras de pequeño volumen (M-1 y M-2) y a la muestra M-4. Los materiales que conformaron las dosificaciones elaboradas por las muestras de pequeño volumen consistieron en la combinación de gravas (12,5-5,4 mm), arena y recebo, otras veces la combinación de gravas (12,5-5,4 mm), arena y ceniza de tostación; todos con las areniscas del yacimiento Castellano y cemento P-350. Por otro lado, los materiales que conformaron las dosificaciones a partir de la muestra M-4, se agruparon de la siguiente forma: la primera dosificación consistió en una combinación de piedra (38-13 mm), arena artificial (1,0-0,15) y cemento P-350; para la segunda, la gravilla (13-6 mm) fue la granulometría mayor, con la misma arena que la primera y el cemento P-350.

III.5. Procesamiento de los datos de campo y estimación de recursos.

La información obtenida como resultado de los trabajos de campo posibilitó la elaboración del Modelo Digital de Terreno a escala 1:10 000 (red 10x10 m), actualizado en relación con los laboreos mineros que ya han sido realizados en el área del yacimiento Castellano. Esto se logró mediante la aplicación del método de inverso de distancia al cuadrado a los datos resultantes del levantamiento topográfico-geodésico, con la aplicación del software Surfer 12.

Sobre el mapa topográfico resultante se representaron los elementos geológicos y estructurales indispensables para la cartografía geológica, obtenidos durante los itinerarios geológicos, además de los lugares donde se realizaron los surcos de muestreo.

El mapa geológico, primeramente, se confeccionó de forma tradicional en una versión sobre cartulina; su versión final y los cortes geológicos se elaboraron mediante dibujos realizados con la ayuda del software Surfer 12.

Por último, las estimaciones de volúmenes y recursos de areniscas y limolitas intemperizadas se realizaron mediante la delimitación en superficie de las areniscas, contorneadas por la cota +70 m. De tal forma, los límites establecidos fueron la superficie del terreno con afloramientos de areniscas y el plano horizontal definido por esta cota. El cálculo del volumen

Para la determinación de ese nivel se tuvo en cuenta la potencia de la zona de oxidación en el campo mineral Santa Lucía-Castellano y en el yacimiento (aproximadamente 20,0 m), la potencia conocida de los sondeos de exploración en el propio yacimiento Castellano y la presencia del nivel 60,0 m, consistente en un laboreo minero pretérito, el cual descubre la secuencia de la zona de oxidación, la roca fresca y la mineralización sulfurosa en el noreste del yacimiento y del área de estudio. Entre el plano formado por ese nivel y los límites de la superficie topográfica (área superior) generada por los datos del levantamiento topográfico del área dentro de los límites anteriores se calculó el volumen total del material estudiado. Se consideró que las intercalaciones de limolitas en el macizo de areniscas representan el 30 % (Vologdin *et al.*, 1977). De esta forma se calculó el volumen de limolitas multiplicándose el volumen total del macizo por 0,30, mientras el volumen de las areniscas resultó de la diferencia entre el volumen del macizo y el volumen de las limolitas. Para la estimación de los recursos (tonelaje) se asumió un peso volumétrico para las limolitas de 2,01 t/m³ equivalente al calculado durante los trabajos de evaluación de recebo en el yacimiento Santa Lucía, mientras para las areniscas se adoptó un valor de 2,5 t/m³ determinado mundialmente para esta variedad litológica.

III.6. Valoración de los beneficios ambientales.

Para la conformación de los aspectos ambientales se analizaron los instrumentos legales, más importantes del país como Ley 81 "Del Medio Ambiente", Ley 76 "Ley de Minas, Ley 33 "De Protección del Medio Ambiente y el Uso Racional de los Recursos Minerales", etc., se consultaron todos los informes del tema en la localidad y en el yacimiento, así como la literatura internacional. Sin embargo, la información básica que se utilizó para este trabajo fueron los trabajos de evaluación de impacto ambiental del Proyecto Polimetálico

Castellano, llevado a cabo por CESIGMA, S. A. (2007). Esa información sirvió para seleccionar los impactos negativos que se provocarían como consecuencia del uso de las areniscas estudiadas.

III.7. Conclusiones parciales del capítulo

- La metodología de los trabajos se basó en las exigencias de las normas cubanas durante la realización de la investigación.
- Durante los trabajos se emplearon normas que después fueron actualizadas como la NC- 251: 2005 que su versión más actualizada es la NC- 251: 2013. Esta actualización se tuvo en cuenta y en todos los casos, en la realización final de ese trabajo.
- El esquema de trituración propuesto considera las características naturales de las areniscas intemperizadas, las cual presenta una proporción de areniscas cuarcitizadas e intercalaciones de limolitas caolinizadas, que le aportan al árido fragmentos duros y un por ciento de partículas finas, respectivamente.
- Las muestras de pequeño tamaño (M-1 y M-2) y la muestra molida en el molino industrial (M-4) no fueron ensayadas por el esquema de trituración propuesto.
- Los aditivos de las mezclas de mortero y hormigón ensayadas en el laboratorios fueron de origen local, ellos son: cenizas de pirita tostada y recebo (caolinita) del yacimiento Castellano y el yacimiento Santa Lucía.

Capítulo IV. Análisis y discusión de los resultados.

En este capítulo se presentan los resultados fundamentales del trabajo investigativo, con énfasis en los posibles usos de las areniscas del yacimiento Castellano y las implicaciones de este proceder en la reducción del impacto ambiental negativo resultante de los escombros derivados de la explotación de la mineralización sulfurosa.

IV.1. Resultados de los trabajos geológicos de campo.

Como es sabido, los trabajos geológicos de campo consistieron en los itinerarios geológicos y el muestreo de rocas, los cuales tuvieron el objetivo de confeccionar el mapa geológico del área y caracterizar a las areniscas química y granulométricamente. Los trabajos de campo son representados en el mapa de datos reales del área de estudio (figura IV.1).

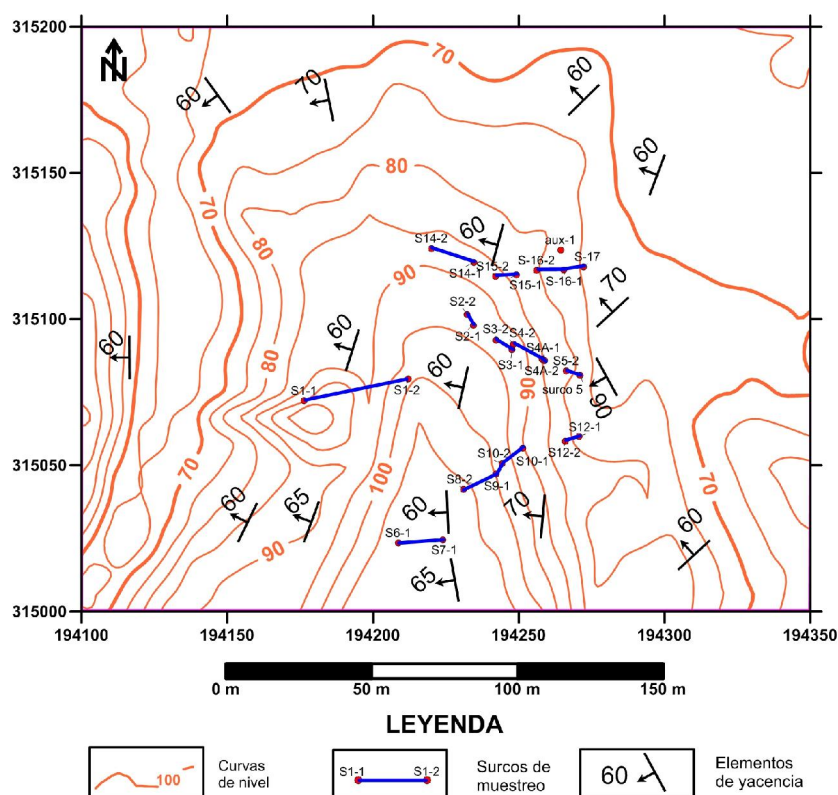


Figura IV.1. Mapa de datos reales de los trabajos ejecutados en el campo

IV.1.1. Itinerarios geológicos.

Estos resultados permitieron observar la posición estratigráfica de las areniscas y posibilitaron tener una idea de las características litológicas, mineralógicas y estructurales de las areniscas, así como su comportamiento físico-mecánico, derivado de la tectónica, el intemperismo o la actividad antrópica. Todos estos aspectos definieron que las areniscas, desde el punto de vista geológico, se corresponden con las rocas de la parte inferior de la Formación San Cayetano (J_1 - J_3^2), Miembro indiferenciado (J_{1-2}) (Astajov y Soknin, 1985), el cual consiste en una secuencia de areniscas cuarzosas y cuarzo-feldespáticas que subyace el paquete de rocas hospedadas (pizarras) de la mineralización pirito-polimetálica del yacimiento Castellano.

Las rocas del miembro Inferior, en los límites del yacimiento Castellano, a partir de los resultados de los estudios de la roca no intemperizada, fueron caracterizadas por Vologdin (1977) por la composición arenosa y aleurolítica (limolítica) de las rocas que lo integran. Las rocas más difundidas en este paquete son las areniscas cuarzosas de granulometría fina, en algunos sectores de granulometría medio a gruesa, con intercalaciones y lentes de gravelitas, pizarras negras y limonitas. Debido a eso la roca adquiere una estratificación paralela precisa bien manifestadas en las afloramientos. Frecuentemente en las areniscas se detecta una estratificación oblicua y también brechas de cosedimentación, y se desarrolla la pirita con mineralización cuprífera. La textura de las areniscas y limolitas es samítica y aleurosamítica (dimensiones de los granos 0.1 – 0.2 mm). Los fragmentos están representados preferentemente por granos bien redondeados y clasificados, de cuarzo y, raras veces, feldespatos. Un papel subordinado lo juegan los fragmentos cuarzo-silíceos, las escamas de moscovita, doleritas. Dentro de los minerales accesorios se han encontrado zircón, rutilo, apatita y turmalina. El cemento de las rocas es cuarzoso y cuarzo-hidromicáceo. La estructura del cemento es intersticial o de contacto. Con mucha frecuencia en las rocas se detecta una regeneración de los granos de cuarzo lo que genera que la roca adquiera un aspecto cuarcitoide. El proceso más intenso de cuarcificación se observa en los sectores de agrietamiento elevado y cerca de las zonas tectónicas, donde

toman lugar de forma irregular, los cuerpos de cuarcitas o cuarcitas – areniscas, donde a veces se asocia la mineralización pirítica y cuprífera (stockwork).

Las areniscas de referencia están comprendidas dentro de los límites de la zona de intemperismo (fuertemente intemperizadas). Son de color gris con tonalidades pardo-rojizas y amarillentas, Se desarrolla la mineralización de stockwork hematito-limolítico, acompañada de mineralización cuprífera supergénica. Está presente la caolinita, generalmente, reemplazando las rocas originarias de granos arcillosos (lutitas, limolitas y pizarras) probablemente por la alteración hidrotermal y por los granos de feldespatos que componen las areniscas.

Estructuralmente estas rocas yacen con rumbo noreste-suroeste (60°) y con un ángulo de inclinación promedio de 65° hacia el noroeste, aunque, a veces alcanzan los 90° .

Los límites convencionales de área estudiada son:

Largo: 295 m

Ancho 160 m

Potencia máxima: 30 m

Potencia mínima: 10 m

Potencia promedio: 15 m

Desde el punto de vista físico-mecánico las areniscas están intensamente tectonizadas, agrietadas y fracturadas, como consecuencia de la actividad tectónica, climática y antropogénica, lo que contribuye a minimizar los costos de explotación.

IV.1.2. Muestreo de rocas.

Como resultado del muestreo de rocas en el campo, se logró la toma de las muestras representativas del yacimiento para los diferentes ensayos (físico-mecánico y químico) en las distintas escalas (de laboratorio, planta piloto e industrial).

Durante el muestreo se realizó una caracterización macroscópica integral de cada muestra (anexo textual 1), información que sirvió de base a los ensayos físicos y análisis químicos que se le realizaron con posterioridad.

IV.2. Propiedades de las areniscas.

IV.2.1. Composición química.

En el área de estudio los análisis químicos se le realizaron a 17 muestras, obteniéndose como promedio los resultados siguientes: SiO₂: 80,09 %, Al₂O₃: 8,87 %, Fe₂O₃: 5,40 %, MnO: 0,02%, CaO: <0,017 %, MgO: 0,38%, TiO₂: 0,48 %, ZrO₂: 0,016 %, Na₂O: 0,05 %, K₂O: 0,73 %, SO₃: 0,28 % y PPI: 2,29 % (Anexo textual 2).

Es indiscutible que las características naturales de la materia prima reflejan su potencial industrial. En los resultados de la composición química se puede apreciar que el contenido promedio de sílice (SiO₂): 80,09 %, es relativamente alto, lo que le añade dureza al árido, el azufre (0,28 %) está muy por debajo de la tolerancia de la norma (NC-251: 2005) vigente, que admite hasta 1%.

Es obvio que, teniendo en cuenta el vínculo genético y espacial con la mineralización sulfurosa del yacimiento Castellano, el azufre total con valores promedios tan bajos determinados en las areniscas son resultados de los procesos de meteorización química y física que afectaron a la roca durante el período geológico reciente.

En la literatura internacional el valor de azufre promedio calculado en las areniscas, pueden compararse con el valor promedio de 0,63 %, determinado en escorias de SiMn (Frías *et al.*, 2006).

El contenido de cloruro (Cl⁻) no se determinó; no obstante, es importante destacar las palabras de Velaú (2012) cuando expresó acerca de las areniscas analizadas que “evaluando los resultados de los ensayos realizados hasta la fecha por nuestro Laboratorio con el empleo de esta materia prima, podemos decir que: no existen comportamientos negativos en las mezclas realizadas con la arenisca en la dosificación de morteros y hormigones que hemos ensayado. Los morteros ensayados industrialmente mostraron resultados positivos”.

IV.2.2. Composición granulométrica.

Los resultados obtenidos sobre la composición granulométrica de las areniscas (árido fino y árido grueso) son descritos a continuación:

A. Para árido fino

Para valorar la composición granulométrica del árido fino se utilizaron las muestras de pequeño volumen (M-1 y M-2) así como la muestra de planta piloto (M-3).

Resultados de las muestras (M-1 y M-2) de pequeño volumen.

Por los resultados granulométricos (módulo de finura y el tamiz 75 μm) estas muestras fueron reportadas como no conforme (Neira *et al.*, 2011), apoyado en la norma NC 251: 2005.

Los resultados iniciales del comportamiento granulométrico de los áridos generados por las areniscas estudiadas se pueden apreciar en las tablas IV.1 y IV.2, donde se puede valorar, por los datos de la tabla IV.2, que el módulo de finura para la muestra M-2 fue calculado con el valor de 3,18 y para la muestra M-1, por los datos de la tabla IV.1, con menor valor (2,67). Esto quiere decir que los datos anteriores están en correspondencia con los límites de tolerancia máxima (2,2-3,58) de este parámetro en las normas C 251: 2005 y NC 251: 2013 (más actualizada). Para el tamiz 200 mallas (75 μm) la situación es diferente, puesto que los valores obtenidos en los ensayos fue de 12,5 % y las mismas normas mencionadas arriba admiten hasta 7 % (tabla I.4).

A pesar de estos resultados, estos datos sirvieron para orientar la metodología adecuada que permitió evaluar estas areniscas según sus condiciones naturales y, como aseveró Neira *et al.* (2011), permitieron las determinaciones posibles para la elaboración de morteros y hormigones.

Tabla IV.1. Composición granulométrica de la muestra M-1.

Tamices (mm)		9,52	4,76	2,38	1,19	0,59	0,297	0,149
% Pasados		100	88	61,5	76,9	61,8	26	19
Especificaciones de Calidad	Mín.		90	70	45	25	10	2
	Máx.	100	100	100	80	60	30	10

Tabla IV.2. Composición granulométrica de la muestra M-2.

Tamices (mm)		9,52	4,76	2,38	1,19	0,59	0,297	0,149
% Pasados		100	88	60	50	39	26	19
Especificaciones de Calidad	Mín.		90	70	45	25	10	2
	Máx.	100	100	100	80	60	30	10

Resultados de la muestra M-3 a escala de planta piloto.

Teniendo en cuenta lo anterior, el comportamiento granulométrico, en realidad, pudiera considerarse como elemento definitorio de las características cualitativas de la materia prima los resultados de la muestra tecnológica de 3,0 t (M-3) realizada en la planta piloto de la Unidad Geólogo-Minera, de la Empresa Geominera de Pinar del Río.

De acuerdo con la tabla IV.3 las muestras ensayadas (PP-1-1 y PP-1-2) obtuvieron una clasificación conforme con las normas NC-182: 2002 y NC-251: 2005 y NC-251: 2013) al tener módulos de finura dentro de los rangos de valores permitidos por la norma (2,2-3,58): para la muestra PP-1-1: 2,67 y para la muestra PP-1-2: 3,58.

Tabla IV.3. Composición granulométrica de la muestra M-3.

Tamices		Muestra: PP -1-1		Muestra: PP -1-2	
		Réplica 1 (500,0 kg)	Réplica 2 (401,0 kg)	Réplica 1 (491,2 kg)	Réplica 2 (490,0 kg)
Mallas	mm	% Retenido Acumulado	% Retenido Acumulado	% Retenido Acumulado	% Peso Retenido
2	9,52	0	100	0	0
4	4,76	3,98	4,59	29,6	23,8
8	2,38	20,36	19,13	46,8	39,8
16	1,19	38,62	37,16	60,5	54
30	0,59	53,46	51,37	69,5	64,2
50	0,297	71,62	68,35	79,8	74,9
100	0,149	84,72	82,12	88,1	84,9

Los valores para el tamiz 200 mallas (75 μ m) tuvieron un comportamiento diferenciado entre una muestra y otra, propio de las características naturales del material: para la muestra PP-1-1: 21,51 %, y para la muestra PP-1-2: 5,03 % (anexos textuales 3-A y 3-B). Con los resultados granulométricos de la muestra M-3 se definió el esquema de tratamiento de las areniscas (figura III.3).

Por los resultados granulométricos de la muestra M-4, también en las fracciones ensayadas para arena artificial (5-0,15 mm), todos los valores de los tamices que se evaluaron fueron conforme a las normas mencionadas.

Analizando los resultados de las muestras pequeñas ensayadas a escala de laboratorio (M-1 y M-2), se puede deducir que la granulometría, con un tamizaje adecuado, se logra conformar los rangos de granulométricos exigidos por la norma, tal como se hizo en el ensayo de la muestra M-4 durante la reelaboración de las dosificaciones con la reducción de la proporción del tamiz 200 mallas y la arena (Fragoso *et al.*, 2014^b).

Hay una dicotomía por los resultados granulométricos de las diferentes muestras, en cuanto al módulo de finura y el material más fino que el tamiz 200 mallas (0.074 mm). Es bien sabido que las areniscas presentan determinada proporción de caolinita, la cual es la granulometría que caracteriza al material ultrafino, fundamentalmente.

Burriel (2006) plantea que el material fino en algunos, áridos alternativos, bastante usado en el mundo hoy en día, no se utiliza y pone como ejemplo que el tamaño mínimo permitido de árido reciclado es de 4 mm, puesto que el contenido de finos o polvo no se refiere al contenido de arena fina ni a la cantidad de piedras de tamaño menor, sino a la suciedad que presentan los áridos, tamaños inferiores a 0,065 mm.

El material ultrafino de las areniscas del yacimiento Castellano, a diferencia de otras rocas que constituyen materiales para áridos, se puede utilizar como aditivo o recebo, que es lo que se está haciendo por la población de la localidad. Similar material (recebo producto de la caolinización de las areniscas y limolitas) fue ubicado, muestreado y evaluado en el yacimiento pirito-polimetálico Santa Lucía y ensayado en pruebas de hormigón en los laboratorios de la ENIA, con resultados satisfactorios (Cuni *et al.*, 2010).

El módulo de finura es, en correspondencia con la composición mineralógica y petrográfica descrita anteriormente, uno de los problemas que, requiere sin dudas, un tratamiento especial en el material evaluado. Pero, analizando los resultados de las muestras, donde el módulo es de 3,06 (M-1), 2,52 (M-2), 2,67 (PP-1-1, M-3) y 3,58 (PP-2, M-3), al compararlo con las normas (NC-251: 2005 o la NC-251: 2013), tienen los valores dentro de los límites permitidos por las normas (2,2 y 3,58).

Es destacado el parámetro de las impurezas orgánicas, el cual representan a la Placa No.1 y se comporta favorable en esta materia prima en todas las muestras evaluadas.

B. Para árido grueso.

Estos resultados fueron evaluados a partir de los ensayos realizados por el laboratorio de la ENIA a la muestra M-4, donde se valoraron los rangos granulométricos para piedra (38-13; 12-5 mm) y arena artificial (5-0,15 mm).

Neira *et al.* (2011) ya se había referido a las inconformidades del % de fino, con respecto a las normas durante los ensayos de las muestras de pequeño volumen.

Fragoso *et al.* (2014^b) concluyó que la arenisca presentaba un alto por ciento del material más fino que el tamiz 200 mallas (75 μ m) en los tamices evaluados para la muestra M-4: 38-13 mm (4.16 %); 12-5 mm (8,62 mm) y 5-0,15 mm (13,30%).

Los resultados granulométricos obtenidos durante la trituración del material que conformó esta muestra se recogen en las tablas IV.4, IV.5 y IV.6.

Tabla IV.4. Composición granulométrica para piedra (38-13 mm).

Tamices (mm)		50,8	38,1	25,4	19,1	12,7	9,52
% Pasados		100	81	60	16	7	4
Especificaciones de calidad	Mín.		90	-	20	0	0
	Máx.		100	-	60	15	5

Tabla IV.5. Composición granulométrica para granito (12-5 mm)

Tamices (mm)		19,1	12,7	9,52	4,76	2,38	1,19
% Pasados		100	100	79	15	12	11
Especificaciones de calidad	Mín.	100	90	40	0	0	-
	Máx.		100	70	15	5	-

Tabla IV.6. Composición granulométrica para arena artificial (5-0.15 mm)

Tamices (mm)		9,52	4,76	2,38	1,19	0,59	0,295	0,149	200
% Pasados		100	94	81	62	45	19	7	
Especificaciones de calidad	Mín.		90	70	45	25	10	2	
	Máx.		100	100	80	60	30	10	

En la figura IV.2 se muestra la distribución de las fracciones granulométricas conforme a la norma en el rango de fracciones entre 5- 0,15 mm para la muestra M-4.

A pesar de los resultados mencionados por Fragoso *et al.* (2014^b), no es posible concluir sobre las propiedades granulométricas de las areniscas sin cumplir con la metodología propuesta por esta investigación, referida al esquema de trituración definido en este trabajo, el cual no se tuvo en cuenta durante la etapa inicial del tratamiento de la muestra en la planta industrial.

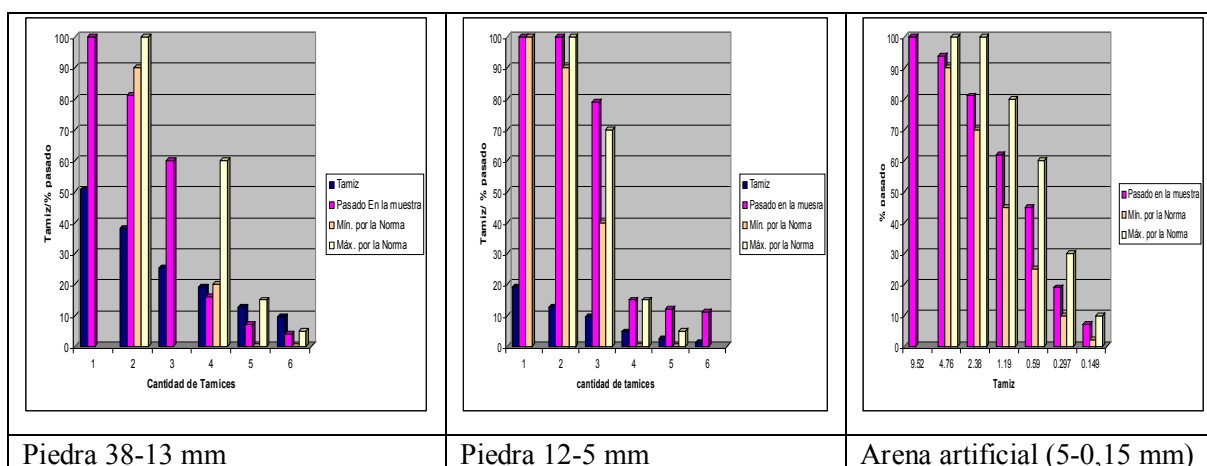


Figura IV.2. Distribución de las fracciones granulométricas de la muestra M-4

Durante el análisis de la muestra M-4, con el propósito de evaluar las areniscas para viales (como base y sub-base) se elaboró el gráfico granulométrico para suelo (figura IV.3) en el cual la morfología de la curva adoptan una disposición suave y continua, indicando una granulometría continua (Bañón, 2001), lo que quiere decir que prácticamente la totalidad de los tamices tienen material, por lo que existe una variación escalonada del tamaño de los granos.

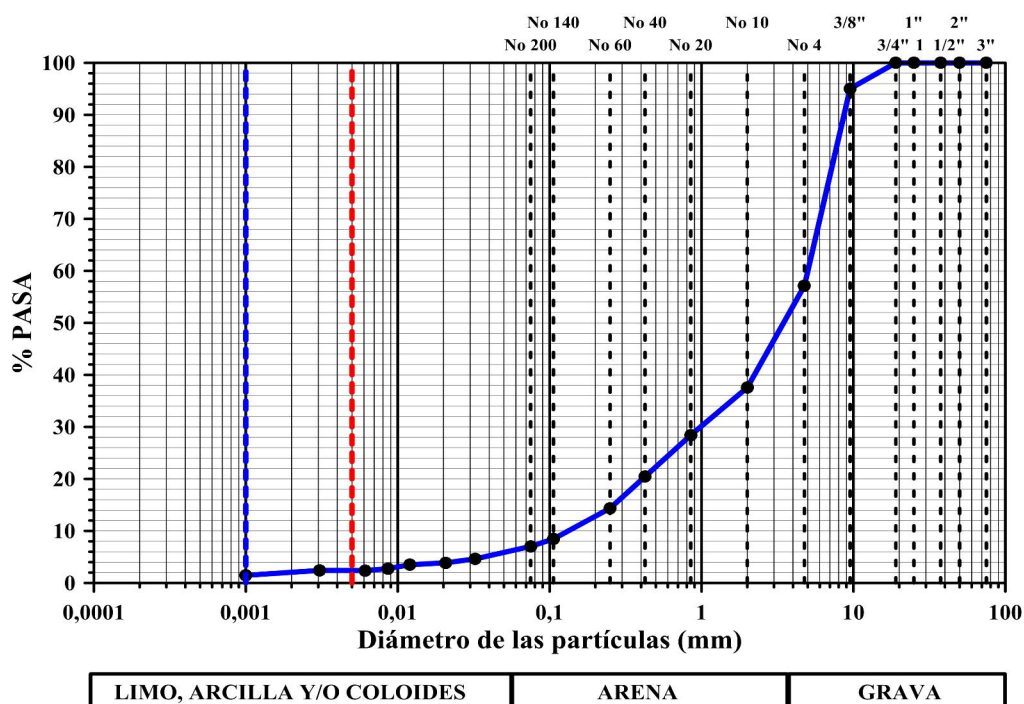


Figura IV.3. Gráfico granulométrico para suelo (Fragoso *et al.*, 2014^a).

IV.2.3. Principales propiedades físicas.

La mayor cantidad de propiedades físicas fueron determinadas a partir de los ensayos realizados a la muestra M-4 (Fragoso *et al.*, 2014^b).

Un parámetro determinante en las propiedades físicas de los áridos es la densidad. Como ya se expresó anteriormente, la densidad (peso volumétrico) para las areniscas se valora internacionalmente de 2,11-2,5 kg/cm³). En el caso de las areniscas estudiadas este parámetro no se determinó. Aunque en la muestra M-4 se determinaron el peso volumétrico suelto (1321 kg/cm³) y compactado (1519 kg/cm³) en el laboratorio.

Los resultados del peso específico de las areniscas, según los rangos de tamices ensayados (38-13 mm, 12-5 mm y 5-0,15 mm), se revela que con la excepción del peso volumétrico corriente (con promedio de 2,44 kg/cm³) y el peso específico saturado en el rango de los tamices 12-5 mm (2,42 kg/cm³), también este parámetro resultó inconforme con la norma NC-187: 2002, la cual establece como rango de calidad, para todos los pesos específicos, un valor > 2,5 kg/cm³. Los resultados se muestran en la tabla IV.7.

Tabla IV.7. Peso específico de las areniscas.

Ensayo	38-13 mm	12-5 mm	5-0.15 mm	Promedio
Peso específico corriente (kg/cm ³)	2,443	2,49	2,429	2,440
Peso específico saturado (kg/cm ³)	2,528	2,42	2,503	2,524
Peso específico aparente (kg/cm ³)	2,653	2,653	2,629	2,629

Otros parámetros de calidad que no cumplen con la norma son: la absorción de agua, abrasión de los Ángeles y el por ciento de partículas planas y alargadas (Fragoso *et al.*, 2014^b).

La absorción es muy importante porque influye en la durabilidad del árido. La absorción media de las fracciones gruesas disminuye cuando se emplean áridos silíceos (Burriel, 2006).

Normalmente se plantea que la arenisca tiene un coeficiente de absorción muy alto, como promedio 5 % porque tienen una porosidad alta, aunque algunas pueden llegar hasta 13 % (Equipo editorial construcción Visa, 2014). En el caso de las areniscas estudiadas, la absorción se le puede atribuir a la composición arcillosa (caolinita), porque las partículas gruesas se componen, generalmente, de areniscas cuarcitizadas, lo cual reduce la porosidad en la roca.

Los resultados de la absorción de las areniscas, según los rangos de tamices ensayados, se resumen en la tabla IV.8.

Tabla IV.8. Coeficiente de absorción determinado a la muestra M-4

Tamices	Coeficiente de absorción
38-13 mm	3,09
12-5 mm	3,79
5-0,15 mm	3,96
Promedio	3,613

Fragoso *et al.* (2014^b) en su informe de los resultados de la muestra M-4 expone los valores obtenidos de la abrasión los Ángeles, calculados en los ensayos de esta muestra de la siguiente forma: (51,32 % para fracción 38-13 mm y 50,13 % para la fracción 12-5 mm), por lo que se pudo promediar con un valor de 51,15 %; lo cual obliga a eliminar las partículas finas y lograr el beneficio de la roca estudiada, para obtener los fragmentos duros compuestos de alto contenido de sílice.

Las partículas planas y alargadas en el material es otro parámetro que conspira con la calidad del árido logrado, revelado en los ensayos realizados a la muestra M-4. Al respecto, esto puede ser por el desgaste del molino (Fragoso *et al.*, 2014^b); pero, probablemente, entre las causas fundamentales pudiera adjudicársele el efecto de las partículas arenosas incidiendo sobre un material parcialmente fracturado, incluyendo las microfracturas; de ahí la conveniencia de un tamizado inicial previo a la trituración. Esta anomalía en la morfología de los fragmentos observada en el ensayo de la muestra M-4, no se presentó en los fragmentos obtenidos en las restantes muestras, sobre todo en la muestra M-3, donde los granos obtenidos presentaron forma cúbica aproximada.

IV.3. Pruebas de uso para morteros de albañilería y hormigón hidráulico

Las pruebas de uso se desarrollan en los laboratorios con los diseños de mezclas de las diferentes dosificaciones y se concretan en la producción.

Como se expresa en el sub-epígrafe III.4.1, para los ensayos de dosificación de morteros de albañilería y hormigones hidráulicos, los materiales que se utilizaron fueron: arenisca intemperizada del yacimiento Castellano, los cementos PP-250 y P-350 (el primero

utilizado solo en morteros), ceniza de tostación de la pirita y recebo del yacimiento Santa Lucía por un lado y, por otro, sin añadidura de aditivos.

Un requisito indispensable previo a definir las dosificaciones lo constituyó la determinación de las características fundamentales de los diferentes componentes que serían utilizados en las dosificaciones: ceniza de tostación de la pirita de la Planta Sulfometales, cementos Portland P-250 y P-350 y recebo del yacimiento Santa Lucía.

- **Cenizas de tostación de la pirita de la Planta Sulfometales**

Como primera condición para la dosificación de morteros y hormigones se procedió al muestreo y evaluación de la ceniza de tostación de la pirita (anexo textual 4).

Los resultados de la composición química de cada una de las muestras de las cenizas de tostación de la pirita se presentan en el anexo textual 5. Los valores promedio para cada uno de los componentes principales son los siguientes: SiO₂: 14,55 %, Al₂O₃, 2.40 %, Fe₂O₃: 50,34 %, MnO: 0,18 %, CaO: 0,15 %, MgO: 0,26 %, K₂O: 0,56 %, TiO₂: 0,18 %, FeO: 7,03 %, SO₄: 7,85 %, SO₃: 5,88 %, S_t: 11,36 %, PPI: 13,93 %.

La composición granulométrica obtenida de los ensayos realizados se ofrece en la tabla IV.9.

Tabla IV.9. Composición granulométrica de la ceniza de tostación de la pirita

Tamiz (mm)	19,1	12,7	9,52	4,76	2,38	1,19	0,59	0,297	0,149	Fondo
% Retenido Acumulado	0	3	6	19	33	47	58	72	83	0
% Pasado	100	97	94	81	67	53	42	28	17	0

- **Cementos Portland PP-250 y P-350**

Para los ensayos de dosificaciones se emplearon los cementos Portland PP-250 y P-350, los más comunes en el país. Siguiendo las orientaciones de la norma cubana NC 95: 2001. La caracterización de estos dos tipos de cemento se presenta en los anexos textuales 6-A y 6-B, respectivamente.

- **Recebo del yacimiento Santa Lucía**

La caracterización de este recebo se hizo a partir de los resultados del laboratorio de la ENIA de la resistencia a la flexión y compresión de mortero elaborado con cemento P- 350 y este material, el análisis granulométrico e hidrométrico y de impurezas orgánicas. También se determinó la densidad volumétrico *in situ*, la humedad natural, en el laboratorio de la Unidad Geólogo-Minera de la Empresa Geominera de Pinar del Río y se determinó además el coeficiente de esponjamiento. Estos resultados se muestran seguidamente:

Resistencia a la flexo-tracción (MPa) en 7 días: 2.97; en 28 días: 4.2

Resistencia a la compresión (MPa) en 7 días: 14.77; en 28 días 20.57

Como se puede apreciar los valores de resistencia a compresión de las muestras analizadas son elevadas por lo que estas deben de ser utilizadas de acuerdo a lo establecido en la norma en estos casos.

La composición granulométrica para las dos muestras está por debajo de los 2.0 mm, comportándose gradualmente en los tamices 0.85- 0.075 mm. (tabla IV.10).

Tabla IV.10. Composición granulométrica de las partículas arenosas.

Tamiz (mm), % pasado	2.00	0.85	0.425	0.250	0.106	0.075
Recebo 0.5 mm	100	99	89	67	26	21
Recebo 2.5 mm	100	88	63	49	30	28

También los resultados de las partículas que pasan por debajo de 75 μm (limosas y arcillosas) se muestran, con el mismo comportamiento de las partículas arenosas, sobre todo en los tamices 0,02939-0,00135 mm (tabla IV.11) y un resumen del hidrómetro se presenta en la tabla IV.12.

Tabla IV.11. Comportamiento de las partículas limo-arcillosas.

Tamiz (mm), % Pasado	0.03180	0.02643	0.01463	0.01195	0.00851	0.00339	0.00139
Recebo 0.5 mm	13	10	8	8	7	6	2
Tamiz (mm), % Pasado	0.02939	0.02430	0.01358	0.01118	0.00806	0.00326	0.00135
Recebo 2.5 mm	25	23	20	19	16	13	6

Tabla IV.12. Granulometría de las partículas menores de 75 µm.

Muestra	Granulometría (%)			Peso específico de los Sólidos γ_s
	Grueso	Fino	Cohesivo	kN/m³
Recebo 0.5 mm	0	79	21	34,0
Recebo 2.5 mm	0	72	28	34,0

Las impurezas orgánicas presentan Placa 1.

La densidad volumétrica del recebo es de 2.01 t/m³.

La humedad numeral que se le determinó fue de: 7.30 %.

El coeficiente de esponjamiento es de: 1.65.

El recebo del yacimiento Castellano es el material fino (ultafino) de las areniscas.

IV.3.1. Dosificaciones de morteros de albañilería.

En la tabla IV.13 se resumen las dosificaciones para morteros de albañilería para elementos de pared con las mezclas elaboradas con los diferentes materiales utilizados

Tabla IV.13. Dosificaciones para mortero de albañilería (para elementos de pared).

Material	Proporción volumétrica			Tamiz (mm)	Requisitos
	Cemento	Arena	Recebo		
P350+arenisca+ceniza de tostación de pirita	1	3-8	1	4,76	94-100 mm Arena cernida
				2,38	95-100 mm Arena cernida
				1,19	95-100 mm Arena cernida
P350+arenisca	1	3-8	1	4,76	95-100 mm Arena cernida
				2,38	95-105 mm Arena cernida
				1,19	95-100 mm Arena cernida
P350+arenisca +recebo	1	3-8	1	4,76	94-100 mm Arena cernida
				2,38	98-100 mm Arena cernida
				1,19	95-100 mm Arena cernida

Las pruebas de uso fueron realizadas en los laboratorios de la ENIA. Es conocido que para el diseño de las mezclas de morteros de albañilería fueron utilizados los tamices: - 4,76 mm, -2,38 mm, - 1,19 mm.

En la tabla IV.14 se muestran los valores promedios obtenidos del parámetro más importante revelados en los ensayos de dosificaciones, donde los morteros diseñados cumplen con los requisitos de la norma NC-170: 2002, la cual exige un valor mínimo de 3,5 MPa.

Tabla IV.14. Resultados de la resistencia a la compresión del mortero de colocación.

Mortero	Resistencia a la compresión (MPa)
Mortero con ceniza de tostación de pirita	11,26
Mortero con recebo	5,33
Mortero sin adiciones o aditivo	10,26

Con los resultados mostrados en dicha tabla se nota que la adición de la ceniza de tostación de pirita eleva el valor de resistencia a la compresión y mejora significativamente el rendimiento del cemento en las mezclas (Vilaú, 2011). Se pudo calcular que la reducción de la cantidad de cemento es de un 15 % (41 kg/m^3), con relación a las dosificaciones sin aditivos.

En el anexo textual 7 se presentan las dosificaciones óptimas de morteros de revestimientos o repellos y morteros de colocación, lográndose valores de hasta 25.5 y 11.26 MPa, respectivamente, cumpliendo con la Norma Cubana (NC-175: 2002) para los diferentes usos evaluados, las cuales se refieren a los elementos de pared y piso, tales como: para muros portantes de bloques y ladrillos, para muros no portantes de bloques y ladrillo, para piso, para resano grueso en exteriores, para resano grueso en interiores, para resano fino en exteriores y para resano fino en interiores.

IV.3.2. Dosificaciones de hormigón hidráulico.

Estas dosificaciones se hicieron también en los laboratorios de la ENIA. Para estos ensayos las mezclas fueron conformadas con grava (12,5-5,4 mm), arena triturada, recebo del mismo yacimiento Castellano y cenizas de tostación de pirita (tabla IV.15), para la conformación de bloque Tipo II (de 15,0 mm) y con el empleo del material de la muestra M-4 se realizaron ensayos utilizando la piedra (38-13 mm) y la arena (5-0,15 mm).

Tabla IV.15. Materiales utilizados en las dosificaciones.

Materiales	Procedencia
Grava (12,5-5,4 mm)	Yacimiento Castellano
Arenisca	Yacimiento Castellano
Recebo (Limonita caolinizada y Ceniza de tostación de piritita)	Yacimiento Castellano y Planta Sulfometales, respectivamente
Cemento P-350	Mártires de Artemisa

Durante las dosificaciones de bloque primeramente se experimentó con una mezcla conformada por grava y cemento, pero los resultados no fueron los mejores debido a que quedaron muchas oquedades en el hormigón por la carencia de fino (tabla IV.16).

Tabla IV.16. Dosificación No. 1

Materiales	Dosis		Volumen relativo	Parámetros evaluados	
	Cantidad	Unidad		Resistencia a la compresión (MPa) (7 días)	Relación agua/cemento (Ra/c)
Cemento	300	kg/m ³	1	0,7	0,45
Grava (12,5-5,4 mm)	2100	kg/m ³	7		
Agua	135	Litro	19		

Se hicieron dosificaciones de grava, arena, recebo y cemento P-350, con resultados muy altos de resistencia a la compresión (4,6 y 7,8 MPa), a la edad de 7 días (tablas IV.17 y IV.18, respectivamente).

Tabla IV.17. Dosificación No. 2

Materiales	Dosis		Volumen relativo	Parámetros evaluados	
	Cantidad	Unidad		Resistencia a la compresión (MPa) (7 días)	Relación agua/cemento (R a/c)
Cemento	300	kg/m ³	1	4,6	0,86
Grava (12,5-5,4 mm)	1800	kg/m ³	6		
Arena	450	kg/m ³	1,5		
Agua	260	Litro	37		

Tabla IV.18. Dosificación No. 3

Materiales	Dosis		Volumen relativo	Parámetros evaluados	
	Cantidad	Unidad		Resistencia a la compresión (MPa) (7 días)	Relación agua/cemento (R a/c)
Cemento	300	kg/m ³	1	7,8	0,93
Grava (12,5-5,4 mm)	1500	kg/m ³	5		
Recebo	450	kg/m ³	1,5		
Agua	280	Litro	40		

Finalmente se hizo el recálculo de la dosificación para lograr los valores de resistencia a la compresión ideal, según la norma NC-247:2010, como mínimo de 4,0 MPa (tabla IV.19).

Tabla IV.19. Dosificación No. 4

Materiales	Dosis		Volumen relativo	Parámetros evaluados	
	Cantidad	Unidad		Resistencia a la compresión (MPa) (7 días)	Relación agua/cemento (R a/c)
Cemento	230	kg/m ³	1	4,0	0,86
Grava (12,5-5,4 mm)	1380	kg/m ³	6		
Arena	345	kg/m ³	1,5		
Agua	198	Litro	37		

Se prepararon dosificaciones con ceniza de tostación de pirita como aditivo y se obtuvo un valor de 5.0 MPa a la edad de 28 días, como establece la norma señalada, ahorrándose además el 17 % de cemento con esta dosificación (tabla IV.20).

Tabla IV.20. Dosificación No. 5.

Materiales	Dosis		Volumen relativo	Parámetros evaluados	
	Cantidad	Unidad		Resistencia a la compresión (MPa) (7 días)	Relación agua/cemento (R a/c)
Cemento	230	kg/m ³	1	5,0	0,46
Grava (12,5-5,4 mm)	1380	kg/m ³	6		
Cenizo de tostación	345	kg/m ³	1,5		
Agua	214	Litro	40		

En el caso de la dosificación No. 1 (tabla IV.16), conformada por grava, el parámetro de resistencia a la compresión fue muy bajo (0,7 MPa). Sin embargo, el valor de la relación agua/cemento (R a/c) fue de 0,45, el cual cumple con la norma. No obstante, los resultados de las mezclas conformadas con los diferentes materiales aditivos que se utilizaron en esta investigación, como el recebo y la ceniza de tostación de pirita, donde los valores de la cantidad de agua en la mezcla (214-280 L) y cemento (230-300 kg/m³), los valores de R a/c están en el rango de 0,86-0,93 (tablas IV.17–IV.20) ameritan una reconsideración de la metodología planteada.

- **Resultados de las dosificaciones de hormigón hidráulico a partir de la muestra M-4.**

Estos resultados, a pesar de sus inconvenientes, como parte de las investigaciones de los arenisca, fueron recogidos en este trabajo, porque constituyen un elemento más para demostrar que la importancia que la calidad del material estudiado dependerá de la aplicación de la metodología adecuada para minimizar la influencia de los materiales nocivos, como las partículas arcillosas, que contribuyen a aumentar la absorción de agua,

como factor influye, sustancialmente, en las propiedades fundamentales del hormigón elaborado con las areniscas de interés.

Las dosificaciones de hormigón hidráulico a partir del material que conformó la muestra M-4 se elaboraron con cemento P-350, grava (38-13 mm), gravilla (13-6 mm) y arena artificial (1,0-0,15 mm), como se muestra en la tabla IV.21.

Tabla IV.21. Materiales utilizados para las dosificaciones.

Materiales	Procedencia
Cemento P-350	Mártires de Artemisa
Grava (38- 13 mm), gravilla (13-6 mm)	Arenisca yacimiento Castellano
Arena artificial (1,0-0,15mm)	Arenisca yacimiento Castellano

A partir de los datos derivados de los ensayos realizados y teniendo en cuenta las especificaciones de la norma NC-120:2007 en la Dosificación 1, conformada con la piedras y arena artificial areniscas (tabla IV.22), para lograr el valor de resistencia a la compresión de 23 MPa (la norma, en dependencia del tipo de árido, acepta valores que oscilan entre 15 y 35 MPa), se utilizó más cemento (410 kg/m^3) que el mínimo requerido en esa norma ($350\text{-}200 \text{ kg/m}^3$). La relación agua/cemento superó en un 40 % (0,2) el valor exigido por la norma (0,50-0,40) al obtenerse un valor de 0,56.

Tabla IV.22. Dosificación No. 1

Materiales	Dosis		Parámetros evaluados		
	Cantidad	Unidad	Resistencia a la compresión (MPa) (28 días)	Relación agua/cemento	Rendimiento del cemento
Cemento	410	kg/m^3	23	0,7	0,56
Piedra (38-13 mm)	842	kg/m^3			
Arena Artificial tostación	842	kg/m^3			
Agua	305	Litro			

En la Dosificación 2 (tabla IV.23), utilizando la gravilla (13-6 mm) y arena artificial, se logró un valor de resistencia a la compresión menor (19 MPa) que la Dosificación 1, y se

tuvo que utilizar, al mismo tiempo, más cemento (444 kg/m³). La relación agua/cemento se superó en un 52 % (0,26) con relación a la norma, al obtenerse un valor de 0,76.

Tabla IV.23. Dosificación No. 2

Materiales	Dosis		Parámetros evaluados		
	Cantidad	Unidad	Resistencia a la compresión (MPa) (28 días)	Relación agua/cemento	Rendimiento del cemento
Cemento	444	kg/m ³	19	0,76	0,44
Gravilla (13-6 mm)	809	kg/m ³			
Arena Artificial tostación	809	kg/m ³			
Agua	337	Litro			

Por la diferencia en los resultados de las dos primeras dosificaciones, se elaboraron mezclas con las cuales se redujo a nivel de laboratorio el por ciento de material que pasa por el tamiz 200, hasta el punto que cumpliera con la norma (piedra 0,86 % y arena 5,6 %) y se realizó una mezcla de comparación (Dosificación No. 3, tabla IV.24). Al hormigón logrado con dicha mezcla se le determinó un valor de la resistencia a la compresión de 25 MPa, se gastó la misma cantidad de cemento que en la Dosificación 2 y se redujo al valor de 0,65 la relación agua/cemento.

Tabla IV.24. Dosificación No. 3

Materiales	Dosis		Parámetros evaluados		
	Cantidad	Unidad	Resistencia a la compresión (MPa) (28 días)	Relación agua/cemento	Rendimiento del cemento
Cemento	444	kg/m ³	25	0,65	0,61
Piedra (38-13 mm)	809	kg/m ³			
Arena Artificial tostación	809	kg/m ³			
Agua	337	Litro			

Al valorar los resultados de los ensayos de las dosificaciones contenidos en las tablas IV.2, IV.23 y IV.24, Fragoso *et al.* (2014^b) concluyó que se pudo apreciar una ligera mejoría, desde el punto de vista mecánico en la Dosificación 3; pero, no de valores de resistencia a la compresión, los cuales oscilaron entre 19,4-25,0 MPa, acorde con el consumo de cemento empleado por m³ de hormigón.

Considerando nuevamente las condiciones naturales de las areniscas estudiadas, la documentación evaluada en la literatura nacional e internacional y la experiencia de esta investigación, los resultados de las dosificaciones conformadas, tanto para hormigón como para mortero tienen una relación directa con la proporción de arcilla y el comportamiento de la absorción en el árido y, por ende, en las mezclas elaboradas con éste. Como se expresa en el sub-epígrafe IV.4.1 el por ciento de partículas por debajo del tamiz 75 µm se comporta, para la muestra M-4, de la siguiente forma: para la piedra (38-13 mm), 4,16 %; para el granito (12-5 mm), 8,62 %; para la arena artificial (5-0,15 mm), 13,30 % y la norma NC-182: 2002 admite valores < 7 %. Por otra parte en el epígrafe IV.5 se expresa que la absorción, se comporta: para la piedra (38-13 mm), 3,09 %; para el granito (12-5 mm), 3,79 %; para la arena artificial (5-0,15 mm), 3,96 % y la norma NC-186: 2002 tolera valores < 3 %. De esta forma el material representado por la muestra M-4, evidentemente refleja problemas de calidad en y son precisamente los que han estado incidiendo en la propiedades de la mezclas de los hormigones evaluados.

A pesar de los resultados expuestos arriba, es indudable, que el tratamiento granulométrico realizado a la muestra M-4 indica que las areniscas intemperizadas del yacimiento Castellano necesitan un mayor grado de estudio para definir el verdadero potencial de esta roca en su utilización como hormigón.

IV.4. Pruebas de uso de las areniscas como árido para viales.

A partir de la muestra M-4, las areniscas se evaluaron como árido para base y sub-base (figura IV.4) de viales de poca intensidad. En esta ocasión fueron determinados los parámetros fundamentales, acorde con el material que fue evaluado en la muestra, el cual se

definió como grava arenosa con poco contenido de fino, según la norma NC-63: 2000, clasifica como A-1-a (O).

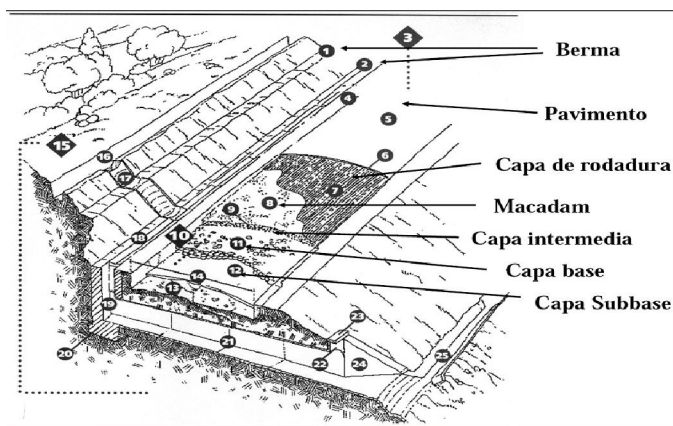


Figura IV.4. Corte de una vía. Posición de las capas base y sub-base

Para la evaluación de los parámetros de calidad del árido para base u sub-base de viales se tuvo en cuenta la norma NC-161:2002. De esa forma, de los resultados de los ensayos para base de viales (tabla IV.25), se incumple solo con uno de los valores del coeficiente de Hacen: el Coeficiente de Uniformidad (C_u) donde se obtuvo un valor de 33,28, con respecto a la norma ($C_u, <4$).

Tabla IV.25. Parámetros de calidad para base de viales

Especificaciones según la norma	Resultados Arenisca Castellano
No menos del 97 % pasa el "tamiz 3 ½"	Pasa el 100 %
Será uniformemente graduada	No cumple
$1 < C_c < 3$	1,48
$C_u < 4$	33,28
$LL \leq 25 \%$ $IP \leq 6 \%$	$\left. \begin{matrix} LL \\ IP \end{matrix} \right\} NP$
$CBR > 60 \%$	90 %

El Coeficiente de Curvatura (C_c , 1.48) está muy por debajo del valor de la norma (entre 1 y 3); así mismo en la norma no menos del 97 % pasa por el tamiz $3\frac{1}{2}$, y, por los resultados obtenidos, el 100 % pasó ese tamiz; de la misma manera, el índice CRB de resistencias del suelo se comporta favorablemente 90 %, con respecto al valor $CBR > 60$ % exigido por la norma. De igual manera ocurre con los datos obtenidos para sub-base de viales (tabla IV.26) donde los parámetros analizados tuvieron los mismos valores que los evaluados para basa.

Tabla IV.26. Parámetros de calidad para sub-base de viales.

Especificaciones según la norma	Resultados Arenisca Castellano
No menos del 90 % pasa el "tamiz $3\frac{1}{2}$ "	Pasa el 100 %
Será uniformemente graduada	No cumple
$1 < C_c < 3$	1,48
$C_u < 4$	33,28
$LL \leq 25$ % $IP \leq 10$ %	LL IP
$CBR > 20$ %	90 %

Una vez más los problemas derivados del desgaste de molino donde fue molida la materia prima y la no observancia de la metodología propuesta para el tratamiento granulométrico y, en adición, la posibilidad de beneficio de las areniscas antes y durante de la trituración, podrían contribuir a eliminar la no conformidad del Coeficiente de Uniformidad obtenido con los exigencias de la norma.

IV.5. Cartografía geológica y estimación de recursos.

IV.5.1. Caracterización de los itinerarios geológicos

Se comprobó la aflorabilidad de las rocas dentro del área permitió la documentación geológica de las principales rocas y los elementos tectónicos (pliegues y fallas). Se documentaron continuamente todos los afloramientos a lo largo de los perfiles y también aquellos más importantes fuera de estos. Se documentaron todos los puntos posibles,

aunque en el mapa se muestran los puntos con a los que se les midieron los elementos de yacencia (azimut y buzamiento) de las rocas. Las rocas predominantes descritas fueron las areniscas cuarzosas de granos finos, a veces cuarcitizadas, las cuales fueron localizadas en todos los perfiles, cubriendo prácticamente más allá de la mitad oriental del sector. En la parte oeste del área los perfiles atravesaron el paquete de pizarras carbonosas, encajantes de la mineralización polimetálica del yacimiento Castellano, así como la propia mineralización sulfurosa aflorando en el Nivel 60. Fueron observadas areniscas brechosas y micropliegues asociados a las zonas de fallas, fundamentalmente en las pizarras y limolitas. En los perfiles 1, 2, y 3 se mapeó una secuencia de limolitas caolinizadas, La cuarcificación y de las rocas a lo largo de los perfiles y la caolinización está presente también tanto en las areniscas como en las pizarras intemperizadas, como se observó en el perfil 1 y 2, donde la mineralización des stockwork en las areniscas se presenta como vetillas de limonita alcanzando algunas de ellas hasta 30 cm de espesor. Los elementos de yacencia (azimut y ángulo de inclinación no se tomaron en aquellos puntos de afloramientos muy inestables y destruidos).

IV.5.2. Interpretación del mapa geológico y cortes geológicos.

Con los itinerarios geológicos se facilitó el levantamiento geológico y, finalmente, la elaboración del mapa geológico (figura IV.5).

La geología del área se caracteriza por la marcada influencia litolo-estratigráfica perteneciente a la Formación San Cayetano (J_1 - J_3^2). Cubriendo todo el centro-este del área yacen las rocas del miembro inferior (J_{1-2} sc) de esa formación, caracterizada por areniscas cuarzosas de granos finos y medios a finos, con intercalaciones de limolitas en forma de lentes que llegan a tener hasta 5,0 m de potencia.

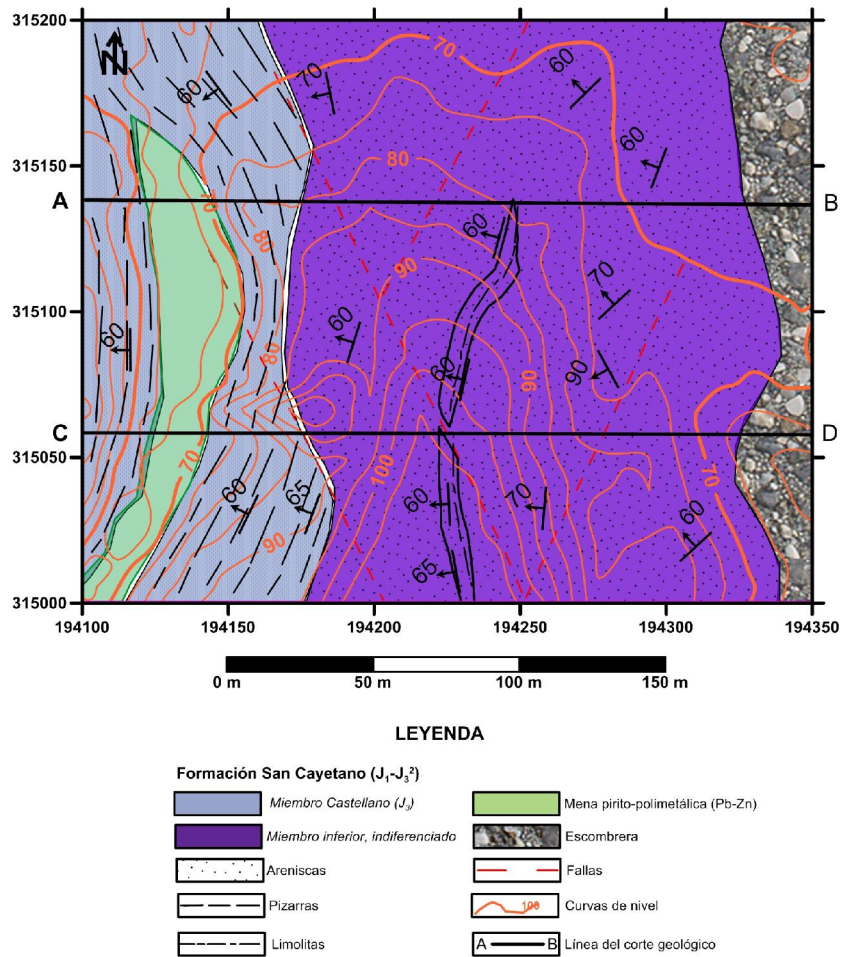


Figura IV.5. Mapa geológico del área de estudio

Las rocas de este miembro se extienden con un rumbo de 55° con inclinación que oscila entre 60° - 70° y, en ocasiones, llegan hasta los 90° , con promedio de (64°) general de los estratos hacia el noroeste (325°). En el contacto, a veces discordante, yacen la pizarras carbonosas del miembro superior (Castellano, J_3 ct) de la mencionada formación, donde se encuentra hospedada la mineralización pirito-polimetálica del yacimiento Castellano, estas pizarras están intercaladas por calizas, dolomitas y limolitas.

Se destacan dos sistemas de fallas, uno que cortan el rumbo de las rocas diagonalmente, con rumbo hacia el noreste, estas fallas son abruptas más de 60° y las fallas de tipo de sobrecorrimientos asociadas al contacto entre las pizarras y las areniscas, las cuales son

intraformacionales, pues se originan como consecuencia del movimiento provocado entre esas dos rocas de diferentes competencias. Estas también tienen un ángulo de inclinación pronunciado, acorde con la inclinación de las rocas.

Las estructuras plegadas más importantes están más relacionadas a las pizarras y tienen su influencia las fallas de mayores dimensiones como las de sobrecorrimientos, éstas se manifiestan con mayor claridad en la parte oeste del área.

Se realizaron adicionalmente dos cortes geológicos transversales con la finalidad de proyectar en profundidad la posición de la mineralización sulfurosa y su relación espacial con las areniscas intemperizadas (figura IV.6).

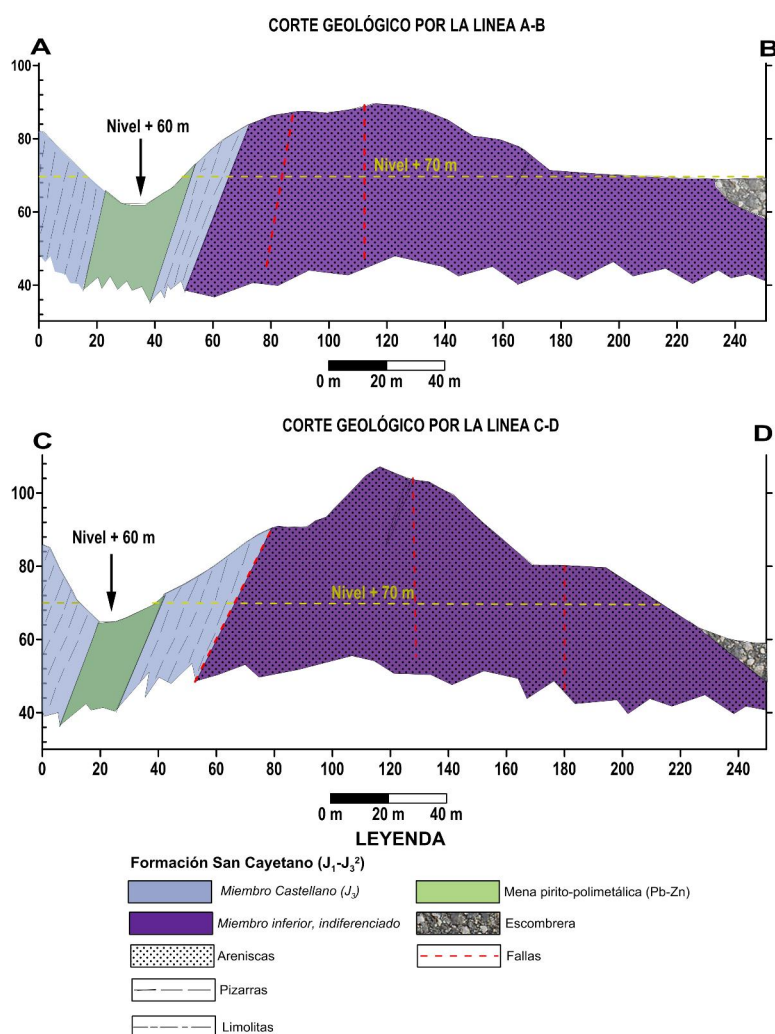


Figura IV.6. Cortes geológicos del área de estudio.

En estos se puede apreciar que la mineralización sulfurosa principal aflora en el nivel 60 como consecuencia de la extracción del sombrero de hierro para la explotación del oro.

Salvo el área que destapó la excavación de la minería pretérita, todas las rocas están intemperizadas, con los productos de la oxidación y las alteraciones que ella conlleva (limonitización, hematitización, pequeños gossan de la mineralización de stockwork oxidada), los cuales alcanzan los 30 cm de espesor en algunas vetas. La caolinización y la cuarcificación en vetillas están también presentes en el área.

Cubriendo completamente el extremo este del sector se mapearon, escombros de la explotación minera anterior, este material yace sobre las rocas del miembro indiferenciado (miembro Inferior).

IV.5.3. Estimación de recursos.

La estimación de los recursos se estableció entre la superficie del terreno y la cota + 70 m (área inferior) dentro de los límites definidos por la isolínea que representa a esa cota en el plano de contornos (figura IV.7).

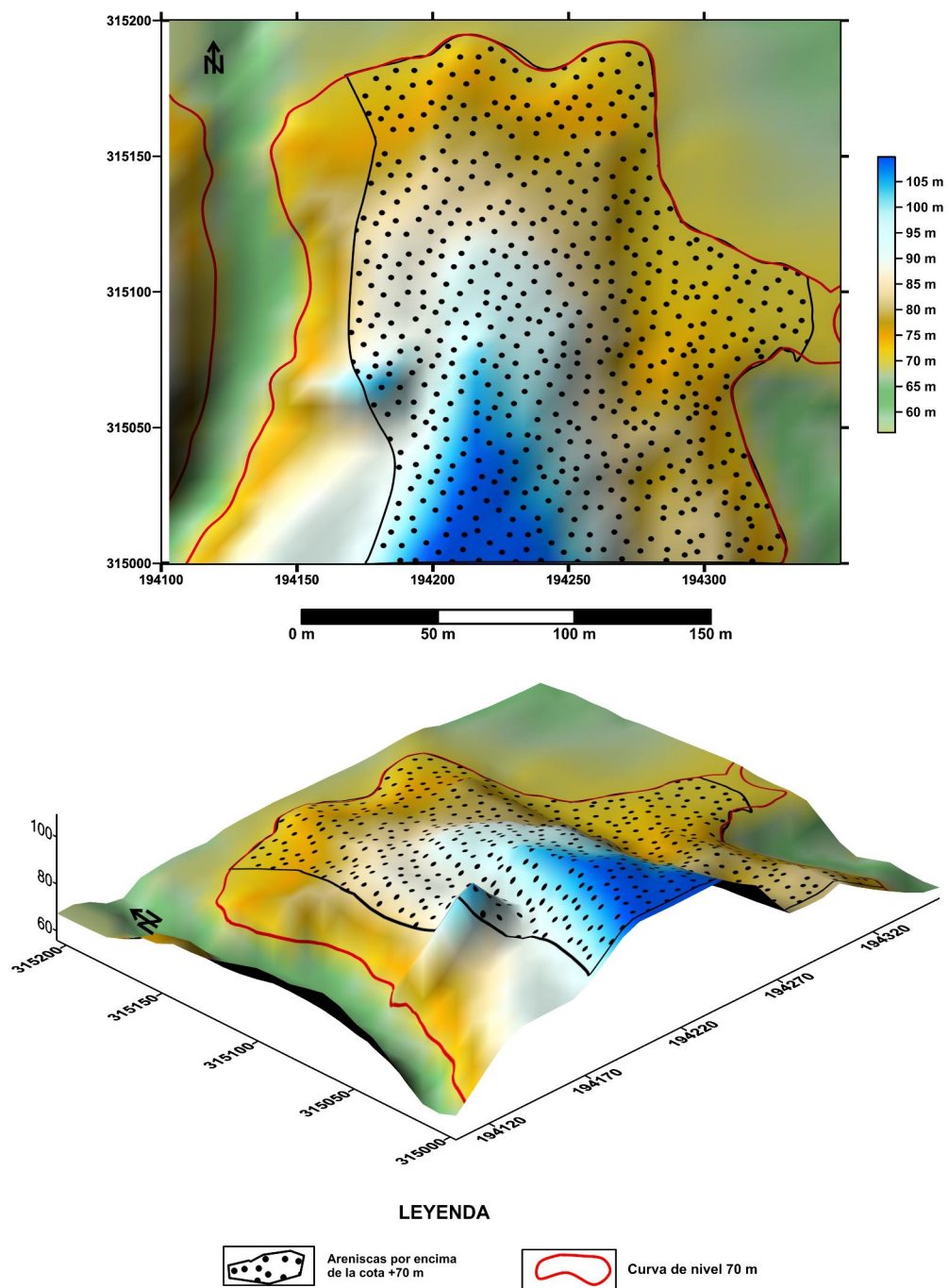


Figura IV.7. Contorno topográfico del área de estudio (a la derecha, el área definida por la Cota +70 m (Bloque 1, B-1) representada en 2D y 3D.

Los resultados del cálculo del volumen total del material estudiado indicaron la existencia de 373492,11 m³ (anexo textual 9).

El volumen y recursos obtenidos de esta evaluación fueron: 261444,48 m³ y 653611,2 t (areniscas) y 112047,63 m³ y 258072,86 t (limolitas) (anexo textual 10).

IV.6. Beneficio ambiental derivado de la utilización de las areniscas intemperizadas del yacimiento Castellano.

El alcance del beneficio ambiental por la utilización de las areniscas como áridos se manifestará, mayormente, durante la ejecución del Proyecto Minero Polimetálico Castellano y, para ello se tendrán en cuenta dos elementos fundamentales:

1. Mitigación del impacto ambiental: Reducción de las áreas previstas para los escombros de la mina, con el manejo oportuno y racional de esos materiales, la utilización de las cenizas de tostación de pirita de Sulfometales, evitar el acarreo de material de otra lugar para relleno de caminos y la utilización para cubierta en el cierre y restauración de la mina.
2. Aspecto económico-social: Disponer de una nueva materia prima alternativa para resolver los problemas constructivos de la economía y de la probación local y a contribución de la reducción de la inversión del Proyecto Minero Castellano, al posibilitar una parte de la materia prima para la construcción de las obras mineras.

IV.6.1. Proyecto Minero Polimetálico Castellano

El Proyecto Minero Polimetálico Castellano es la inversión que se está llevado a cabo en este momento con el objetivo de explotar las menas sulfurosas de plomo-zinc del yacimiento homónimo.

Este se fundamentó en la tendencia al aumento de los precios de los metales en el mercado internacional y los recursos calculados del yacimiento que superan los 12,0 millones de mena.

Su planta de beneficios cuenta con cinco áreas fundamentales:

- Área de trituración.
- Área de molienda y clasificación.
- Área de flotación, espesamiento, filtración y secado de plomo.
- Área de flotación, espesamiento, filtración y secado de zinc.

Se prevé su apertura en los próximos años, con una capacidad para procesar 900 000 t/año de menas, con el fin de producir concentrados de plomo y de zinc destinados a la industria metalúrgica. La duración del proyecto se estimó en 10,3 años.

Se desarrollarán dos minas a cielo abierto, con profundidades de 250 m y alcanzarán un radio de 1 km. El área total de explotación para ambas minas oeste y este se calcula en unas 28,14 ha. El piso de explotación establecido corresponde a la cota -126 y -96 m.

Se construirán: una presa de colas (67,6 ha), un depósito de capa vegetal (7,6 ha) y dos escombreras que totalizarán unas 55 ha, además de la planta de beneficio, talleres y edificaciones administrativas.

La tecnología que se propone para el beneficio de las menas es el método de beneficio hidrometalúrgico convencional con la variante de la automatización de los sistemas de Área de preparación y dosificación de reactivos.

El proyecto se ubica muy cercano al principal polo minero de metales básicos del país, el cual cuenta con una infraestructura y personal técnico, profesional y obreros con preparación.

Las areniscas intemperizadas, como parte de la capa superior de la secuencia del material estéril expuesta al minado se proyecta utilizar en la construcción del muro de la presa de cola. Las investigaciones realizadas a estas areniscas para árido, elevan su valor de uso y, por ende, la implicación económica y social de esa materia prima.

IV.6.2. Impactos ambientales definidos en el Proyecto Minero Polimetálico Castellano.

El estado actual del medio ambiente es la resultante de la forma, magnitud, intensidad y duración de la interrelación sociedad-naturaleza y se manifiesta a través de los impactos ambientales (Encarta, 2009).

Teniendo en cuenta que el impacto ambiental se entiende como el efecto que produce una determinada acción humana sobre el medio ambiente en sus distintos aspectos (Rodríguez, 2008). Los efectos de los impactos ambientales se consideran positivos o negativos y se clasifican como: sociales, económicos, tecnológicos-culturales y ecológicos (Encarta, 2009).

CESIGMA, S. A (2007) identificó, durante el Estudio del Impacto Ambiental (EsIA) del Proyecto Minero Polimetálicos Castellano, los siguientes impactos ambientales en general:

Impactos	Total	Positivos	Negativos
Directos	89	26	63
Indirectos	28	5	23
irreversibles	10	4	6

Estos impactos del proyecto tienen dos áreas de influencia: el área directa que coincide con el territorio donde se desarrollan las diferentes actividades de la explotación (extracción, procesamiento y transporte) y el área de influencia indirecta que está definida por el alcance de los impactos que se desarrollan a partir de estas actividades en los diferentes componentes del medio ambiente, o sea, hasta donde llega la contaminación provocada por los contaminantes del proceso de producción por agua (drenajes ácidos que desembocan en arroyos o ríos), aire (dispersión de partículas y gases por el viento) y suelo (cadena alimentaria), llegando a afectar a animales y personas en el caso de influencia negativa. A otro nivel están los impactos socioeconómicos positivos que pueden ser locales, regionales y nacionales resultado del beneficio económico que reporta la actividad minera.

Principales impactos ambientales vinculados con la explotación de las areniscas estudiadas.

En el caso de la explotación de las areniscas intemperizadas del yacimiento Castellano, la referencia a los impactos negativos será en correspondencia con las labores de arranque del material durante el proceso minero y la caracterización de representar un contaminante sólido de ese proceso minero. Los impactos positivos están representados por los diferentes usos evaluados de la roca como material de construcción, como morteros y hormigones y como base y sub-base de viales.

Por esos motivos al abordar los impactos negativos y positivos se mencionarán aquellos más relevantes coherentes con los aspectos mencionados arriba.

Posibles impactos directos, indirectos y residuales negativos y positivos.

A la geología:

1. Pérdida del substrato rocoso por extracción de las areniscas.

Al relieve:

2. Modificaciones al relieve por movimiento de tierra para la construcción de facilidades e instalaciones.
3. Modificaciones al relieve por laboreo minero, excavaciones y conformación de escombreras y depósitos de colas.
4. Modificaciones al relieve por relleno, conformación final y rehabilitación de excavaciones, escombreras y colera en la fase de cierre.

A los suelos:

5. Pérdida local de suelos por el desbroce y extracción del material

A la calidad del aire:

6. Aumento de las emisiones de polvo por impurezas sólidas provenientes de diversas fases del proceso.
7. Contaminación del aire por emisiones de gases de escape por combustión incompleta de vehículos y motores y los vapores de la voladura.

A la calidad sonora:

8. Incremento de los decibeles de ruido por distintas operaciones.

Al escurrimiento superficial y subterráneo:

9. Posibilidad de aumento de los niveles de sedimentación en las corrientes superficiales.
10. Cambios en el régimen del escurrimiento donde se realizarán las escombreras.

A la calidad de las aguas superficiales:

11. Disminución del arrastre de sedimentos y drenajes, con las escombreras

A las aguas subterráneas:

12. Posibilidad de disminución de los caudales de agua de los arroyos y ríos en las cercanías del yacimiento y su área de influencia.

A la vegetación y flora terrestre:

13. Pérdidas de cobertura vegetal y la diversidad florística resultado de las acciones del movimiento de tierra, así como las emanaciones propias de la exposición del mineral.

A la fauna terrestre y acuática:

14. Muerte y migración de individuos de la fauna por el movimiento de tierra, laboreos mineros y construcción de escombreras.

15. Afectaciones a individuos asociados a las áreas a afectar y ecosistemas aledaños.

A la estética del paisaje:

16. Mejoramiento a la calidad estética del paisaje con respecto a la actual, dentro del marco de un paisaje profundamente afectado por la explotación minera.

A la población y los trabajadores:

17. Afectaciones a la población por aumento de los niveles de polvo y ruido por la explotación y la transportación del mineral.

18. Incremento de la posibilidad de accidentes laborales.

19. Aumento de las posibilidades de empleo e incremento del poder adquisitivo de la población.

20. Conocimiento de nuevas tecnologías por los trabajadores.

21. Adiestramiento en nuevos puestos de trabajo.

22. Elevación de la infraestructura minera, construcción de casas, mejoras de transportación.

A los viales y el tráfico terrestre:

23. Posibilidad de ocurrencia de accidentes de tránsito.

A la economía:

24. Aumento de los ingresos a la economía nacional.

25. Crecimiento de la producción mercantil del municipio.

26. Cambios estructurales favorables en la base económica del territorio.

A los recursos:

27. Aumento del consumo de agua, electricidad y combustible.

28. Agotamiento de los recursos minerales.

Al medio ambiente:

29. Afectaciones al medio ambiente y posibilidad de contaminación de sus elementos (suelos, aire, agua, vegetación, fauna, población).

Se identificaron un total de 29 impactos, de ellos 8 positivos y 21 negativos. Casi la totalidad de los mismos incide directamente dentro del área del yacimiento. Los impactos negativos que pueden tener afectaciones más allá del área de interés son los que se relacionan con la calidad del agua y el aire.

IV.6.3. Medidas para la mitigación de los impactos ambientales negativos.

La mitigación de los impactos ambientales serán tratados en dos direcciones: Los vinculados directamente al área del proyecto y los vinculados indirectamente.

A. Mitigación de los impactos vinculados directamente al área del proyecto.

- Comprende la reducción, al menos en un 25 % las 55 ha propuestas para la ubicación de los escombros de la mina. El volumen en esta área se estimó en alrededor de 5000000 m³, lo cual da la medida de la cantidad de escombros que ello representará durante el minado del yacimiento y la importancia de su uso con fines económicos y la magnitud de la disminución del daño al resto del ecosistema del área.
- La utilización del residuo no utilizado durante la clasificación del árido, generalmente la parte del material fino, puede ser mezclado con cubierta vegetal y utilizarse para la fase final del cierre de la mina.

B. Mitigación de los impactos vinculados indirectamente al área del proyecto.

- El uso de las cenizas de tostación de pirita como aditivo: A los 5 depósitos de colas, sólidos resultantes del proceso piro- metalúrgico que fueron extraídos de los hornos y colocados en el patio de la extinta Empresa Patricio Lumumba (Sulfometales), hoy perteneciente a la Empresa Geominera de Pinar del Río, se le estimó un volumen total

aproximado de 800 000 toneladas. Por cálculos topográficos realizados, existen, sólo en los depósitos tres y cinco, unas 400 000 toneladas.

Todo este yacimiento, desde el punto de vista medio ambiental, significa un grave problema para el ecosistema costero y la población cercana al lugar, que durante años ha sufrido por la contaminación de los suelos, el agua y el aire.

- Evitar el acarreo de material de relleno de caminos de áreas fuera de la concesión del proyecto minero para el relleno de caminos. Para la infraestructura vial del Proyecto Minero Polimetálico Castellano se prevé la construcción de 15,0 km de caminos y se está proponiendo la utilización de material extraído desde otros lugares del territorio fuera de los límites de la concesión del proyecto, con los resultados ambientales adicionales en otras áreas.

IV.6.4. Aspecto económico-social.

En el sub-epígrafe IV.6.2 se relacionan los impactos que contribuyen a establecer un balance positivo de los aspectos económico-sociales en general, en cuanto a generación de la posibilidad de empleo y el aumento de los salarios, crecimiento de la producción mercantil del municipio, cambios estructurales favorables en la base económica del territorio. Sin embargo, en esta ocasión basta mencionar los datos de la Dirección de Vivienda del Poder Popular Municipal de Minas de Matahambre para el quinquenio 2012-2017, donde se estimó una demanda de más de 10 000 m³ de materiales para la construcción y, solo la inversión del proyecto Minero Polimetálico Castellano (Empresa Minera del Caribe, EMINCAR s.a.), exige aproximadamente 4000 m³ de áridos.

Es más significativo el hecho de que hay que tener en cuenta que el municipio Minas de Matahambre asiste a los territorios aledaños como el municipio Viñales, el cual también tiene una creciente demanda de estas materias primas.

Otro elemento de interés consiste en la posibilidad de potenciar el desarrollo constructivo de las obras socio-económicas de la localidad con una materia prima alternativa, certificada por los laboratorios del MICONS.

IV.7. Conclusiones y consideraciones parciales del capítulo.

- Los ensayos granulométricos obtenidos a partir de las areniscas intemperizadas de yacimiento Castellano revelaron que se logra una distribución de las fracciones de los tamices evaluados acorde con las normas NC-182: 2002 y NC-251: 2005 (NC-251: 2013), sobre todo cuando se trata del árido fino
- Se requiere de la aplicación de la metodología (clasificación inicial, trituración y clasificación final) establecida durante este trabajo para la realización de un tratamiento granulométrico que tenga en cuenta las características naturales de las areniscas.
- Los valores del módulo de finura para árido fino obtenidos: 3,06 (M-1), 2,52 (M-2), 2,67 (PP-1-1, M-3 y 3,58 (PP-2, M-3), están dentro de los límites establecidos por la norma NC-251: 2013), que establece el rango de módulo de finura para los áridos finos entre 2,2 y 3,58.
- El material ultrafino producido por la trituración de las areniscas, generado por la caolinita, puede utilizarse como aditivo o recebo.
- La composición química de las areniscas intemperizadas del yacimiento Castellano, determinada por los ensayos de laboratorio indican que estas rocas tienen valores de los principales óxidos, como el SO_3 (0,28%) que está muy por debajo de la norma NC-251: 2005, que admite hasta 1%).
- Los ensayos de dosificaciones obtenidos en el laboratorio demuestran que las areniscas pueden ser utilizadas como morteros de revestimientos o repellos y morteros de colocación norma NC-175: 2002 con los diferentes usos, las cuales se refieren a los elementos de pared y piso, tales como: muros portantes de bloques y ladrillos, muros no portantes de bloques y ladrillo, piso, para resano grueso en exteriores, para resano grueso en interiores, para resano fino en exteriores y para resano fino en interiores.
- La adición de la ceniza de tostación de pirita eleva el valor de resistencia a la compresión y el rendimiento de cemento en los morteros y hormigones (ahorrando hasta un 15% de ese importante material).

- Los resultados de los ensayos de las dosificaciones de hormigón para bloques, elaboradas en el laboratorio, demostraron que se pueden elaborar bloques Tipo II (15,0 cm de espesor).
- Los ensayos de dosificaciones de hormigón hidráulico elaborados en el laboratorio a partir de la muestra M-4 revelaron que las areniscas evaluadas, aunque permite obtener valores de resistencia a la compresión (hasta 26,0 MPa) para ese uso no cumplen con la norma, fundamentalmente, en el material más fino que el tamiz 200 mallas(75 μ m), y la absorción y las partículas planas y alargadas, parámetros que se alejan de las exigencia de calidad; sin embargo, por el tratamiento realizado a esta muestra, esta materia prima amerita un mayor grado de estudio para definir el verdadero potencial de esta roca en su utilización como áridos.
- Los ensayos de laboratorio realizados con las areniscas revelaron que estas rocas cumplen con los parámetros básicos establecidos por la norma para base y sub-base de viales de poca intensidad.
- Durante el análisis de los aspectos medioambientales se identificaron un total de 29 impactos, de ellos 8 positivos y 21 negativos.
- En el análisis de los económico-social se estimó un demanda de más de 10 000 m³ de materiales para la construcción y, sólo la inversión del proyecto Minero Polimetálico Castellano (Empresa Minera del Caribe, EMINCAR s.a.), exige aproximadamente 4000 m³ de áridos.

CONCLUSIONES

Al evaluar las areniscas intemperizadas del yacimiento Castellano en su posible beneficio ambiental, se ha partido de considerarla como una materia prima alternativa para la construcción y constituyente del escombros del proceso minero de explotación de las menas polimetálicas del yacimiento Castellano. Por lo tanto, como resultado de la investigación realizada, se logran los resultados siguientes:

- Las propiedades físico-mecánicas y químicas de estas rocas, avaladas por los resultados de los laboratorios especializados del MICONS y en obras de la producción, demuestran la utilización de las areniscas intemperizadas como árido en la construcción de morteros de albañilería de colocación y revestimiento, lográndose valores de resistencia a la compresión en las mezclas de hasta 25,5 MPa y 11,26 MPa, respectivamente, y como hormigón hidráulico, fundamentalmente en la construcción de bloques, donde se lograron mezclas con valores de resistencia a la compresión de hasta 7,8 MPa en 7 días.
- Las cualidades de las areniscas como hormigón hidráulico en sus diferentes usos, ameritan un estudio más detallado, teniendo en cuenta la cuarcitización a la que fue sometida una parte de esta roca, lo que la hace que se pueda lograr valores de resistencia a la compresión de más de 26,0 MPa.
- El beneficio ambiental por la utilización de las areniscas se avala en los 29 impactos totales (negativos y positivos) atribuidos al proceso de extracción, manejo y tratamiento de estas areniscas, en los cuales 21 impactos negativos clasificados pueden ser mitigados y los 8 impactos positivos descritos forman parte de los aspectos socio-económicos potenciados, que deben tener su reflejo en la población local, fundamentalmente, por las areniscas utilizadas como áridos dentro del desarrollo del Proyecto de Explotación Polimetálico Castellano.

RECOMENDACIONES

La caracterización granulométrica de los áridos generados por las areniscas estudiadas, deben tener en cuenta la naturaleza propia de un material conformado por rocas cuarzosas cuarcitizadas donde se intercalan rocas arcillosas. Por lo que para lograr las mejores propiedades físico-mecánicas de los áridos se debe:

- Separar cuidadosamente, por tamices previos a la trituración, el material ultrafino causante del incremento de la absorción y, consiguientemente, de la disminución de la durabilidad y la resistencia de morteros y hormigones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 54-395-1987. Áridos. Términos y definiciones. Oficina Nacional de Normalización (NC), , La Habana, Cuba.
- Aróstegui, J. M., Bustamente, A. S., Cherniak, V. G., Guerásimov, I. G., Mateo, J. S., Montagne, G., Nikíforov, A. L., Aguisov, A. P., Rodríguez, M., Ruzavin, G. I., Sadovsky, V. y Shviriev, V. (1978). Metodología del Conocimiento Científico. Departamento de Filosofía Academia de Ciencias de Cuba, Instituto de Filosofía Academia de Ciencias de la URSS. Editorial Ciencias Sociales, Ciudad de la Habana, 219 p.
- Astajov, K. y Soknin, V. (1985). Informe acerca de las investigaciones geológicas a escala 1: 50 000 en el noreste de la provincia de Pinar del Río (Hojas 3484-III, 3483-IV y 3483-III).
- Atlas de Asociaciones Minerales en Lámina Delgada. Biblioteca de la Universidad de Barcelona. Edición UB, 1997. Redacción UB, 2003. Impresión en Español.
- Bañón, L. (2001). Materiales pétreos. Propiedades y caracterizaciones de los áridos. <http://www.sirio.ua.es>.
- Batista, R., Coutin, D. P. y Raimundo, F. (2013). “Recursos minerales y el desarrollo local. Caso de estudio, Municipio Guanabacoa, La Habana”. Memorias (versión digital) 5^{ta} Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. La Habana, Cuba.
- Batista, R., González, E. M., García, M. A., González, V. Torres, J. L. y Sosa, D. (2005). “Depósitos de rocas y minerales industriales en Cuba. Sus principales regularidades estructuro-formacionales y perspectivas”. Resúmenes 1^{ra} Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Sociedad Cubana de Geología, Palacio de Convenciones. La Habana, Cuba, 283-284.
- Burriel, A. (2006). “Áridos reciclados para hormigón”. 1^{er} Congreso Nacional de Áridos, Zaragoza.
- Casas, M. (2001). De la economía convencional a la economía de la sostenibilidad. El debate actual sobre el desarrollo: sus conexiones con la problemática ambiental, Universidad de Pinar del Río.

- CESIGMA, S. A. (2007). Estudio de Impacto Ambiental (EsIA) del Proyecto Minero Polimetálicos Castellano (versión digital).
- Contrera, Y. (2014). “Cenizas de la tostación oxidada como material de construcción”, Tesis de Máster en Metalurgia, Departamento de Metalurgia-Química, Facultad de Metalurgia y Electrónica, Instituto Superior Metalúrgico de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez, Holguín, Cuba, 96 p.
- Cuni, J., Contrera, J., Martínez, E., Padrón, L. y Ortega, J. A. (2010). Evaluación de recebo para la construcción. Yacimiento Santa Lucía, XVI Fórum de Ciencia y Técnica, Empresa Geominera de Pinar del Río.
- Decreto-Ley 118 "Estructura, Organización y Funcionamiento del Sistema Nacional de Protección del Medio Ambiente y su Órgano Rector".
- Dubourdieu, B. (2006). Indicadores medioambientales: un primer paso hacia el desarrollo sostenible, 1^{er} Congreso Nacional de Áridos, Zaragoza. (Artículo, Soporte digital).
- Encarta (2009)^a, Biblioteca. Premium, Encontrado en Cuba.
- Encarta (2009)^b, Arquitectura colonial.
- Equipo editorial construcción, Visa (2014). La arenisca y la piedra caliza en construcción. Características físicas de la piedra caliza y arenisca. <http://www.construccion-y-la-piedra-caliza-en-construccion>.
- Fragoso, A. B, Vilaú, L. y Péaz, G. (2014)^b. Informe de los resultados de ensayo de las areniscas del Yacimiento Castellano y las calizas de Teté Contino para hormigones, Laboratorio de Ensayos, Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, Pinar del Río.
- Fragoso, A. B., Vilaú, L. y Péaz, G. (2014)^a. Informe de los resultados de ensayo Evaluación de las areniscas del Yacimiento Castellano y material de la Pica El Cocuyo para el uso en relleno de viales como capa de base sub-base, Investigaciones para la Construcción, Laboratorio de Ensayos, Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, Pinar del Río, 14 p.
- Frías, M., Sánchez de Rojas, M. I. y Rodríguez, C. (2006). Características de la escoria de SiMn y su viabilidad como árido de reciclado en hormigones. 1^{er} Congreso Nacional de

- Áridos Zaragoza. (Artículo, Soporte magnético), C1048AAN, Buenos Aires, Argentina (113, 175).
- Giganto, J., Alfonso J. y Rodríguez M. (2006). Árido calizo versus árido silicio. Congreso Nacional de Áridos, (1^{ro}.2006: Zaragoza), España, 35-37.
- Hamilton, W. R.; Woolley, A. R; Bishop, A. C. (1998). "Minerals, Rocks and Fossils. Hamlyn Gide". Produced by Toppan Printing Co.; (H. K.) Ltd, Printed in Hong Kong.
- Iturralde-Vinent, M. A. (1994). "Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba".
- Jaula, J. A. (2007). El reto de la sostenibilidad en el desarrollo turístico. Una aproximación al caso cubano"; Revista "Economía y Desarrollo", Universidad de La Habana; XXXVIII; Vol. 141, 261– 78.
- Klinchuk, O., Denis, D. y Díaz, C. (1999). Informe del Estudio Geólogo Ambiental Integral del Municipio Minas de Matahambre.
- Legrá, A. A. y Silva, O. R. (2010). La Investigación Científica: Conceptos y Reflexiones, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Dr. Antonio Núñez Jiménez (428 p).
- Ley 33 "De Protección del Medio Ambiente y el Uso Racional de los Recursos Minerales". 10 de enero del 1981.
- Ley 76 "Ley de Minas". 21 de Diciembre de 1994.
- Ley 81 "Del Medio Ambiente". 11 de julio de 1997.
- Lovanov, P. Y., Zhidkov, A. Y. y Estruga, M. (1975). Informe sobre la exploración orientativa del yacimiento pirito-polimetálico Castellano durante 1972-1974 con el cálculo de reservas según estado 1.01.75. : Habana, 1975.
- Martín, J. L., Ventura, C. y Prieto, J. (2006). "Adecuación de una actividad extractiva a la normativa relativa a la prevención y control integrado de la contaminación (IPPCV)". 1^{er} Congreso Nacional de Áridos, Zaragoza. España,
- Mateo, J. M. (2000). Planificación y Gestión Ambiental. Ministerio de Educación Superior, Universidad de La Habana, Facultad de Geografía, La Habana. (Soporte magnético), 7 p.

- Montgomery, W. (1997). Fundamentals of Geology, Therd Edition. Printed in the United States of America by Times Mirror Higher Education Grup, Inc. 2460 Kerper Boulevard, Dubuque, IA 52001, 87, 399 p.
- Moreno, A. (2006). “Áridos Reciclados par hormigones”. 1er Congreso Nacional de Áridos, Zaragoza 2006, .
- NC-120: 2007. Hormigón hidráulico. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba.
- NC-161: 2002. Carreteras. Bases y sub-bases de caliza blanda. Edición Abril 2002. Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba.
- NC-172: 2002. Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a la adhesión por tracción. Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba.
- NC-175: 2002. Mortero de albañilería. Especificaciones, 1. Edición Marzo 2002, Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba.
- NC-178: 2002. Áridos. Análisis Granulométrico, Edición Abril 2002, Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba.
- NC-182: 200.2 Áridos. Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 mm (No. 200). Método de ensayo. Edición Abril 2002. Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba.
- NC-185: 2002. Arena. Determinación de impurezas orgánicas. Método de ensayo 1. Edición Abril 2002. Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba.
- NC-188: 2002. Áridos Gruesos. Abrasión. Método de ensayo. Edición Abril 2002. Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba.
- NC-189: 2002. Áridos Gruesos. Determinación de partículas planas y alargadas. Método de ensayo. Edición, Abril 2002. Oficina Nacional de Normalización (NC, La Habana, Cuba.
- NC-190: 2002. Áridos Gruesos. Determinación del Índice de Trituración. Edición, Abril 2002. Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba.
- NC-20: 1999. Geotecnia. Determinación de la granulometría de los suelos. Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba.

- NC-251: 20013. Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos. Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba.
- NC-251: 2005. Áridos para Hormigones Hidráulicos. Requisitos. Edición, Mayo 2005. Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba.
- NC-506: 2007. Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la resistencia mecánica, Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba.
- NC-54-264: 1984. Materiales y Productos de Construcción. Polvo de Piedra, Impreso CEN.
- NC-55-395: 1987. Materiales de la Construcción. Áridos. Términos y definiciones. Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba.
- NC-63: 2000 Geotécnia. Clasificación de los suelos para obras de transporte, Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana. Cuba.
- NC-657: 2008. Árido para mortero de albañilería. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba.
- NC-671: 2008. Áridos. Toma de muestras. Edición Noviembre 2008. Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba
- NC-95: 2011. Cemento Pórtland. Especificaciones, Oficina Nacional de Normalización (NC) Calle E, No. 261, La Habana, Cuba.
- NC-97: 2011. Cemento Albañilería. Especificaciones, Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba.
- Neira, E., Enríquez, E., Vilaú, L. y Castillo, V. (2011). Informe técnico de árido del yacimiento Castellano, Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas. UIC No.1, Pinar del Río. P-2
- O' Reilly, V. (1997). Métodos para la dosificación del concreto. Folleto 1, MICONST, Cuba.
- Pszcolkowski, A., Pistrowski, K. Piotrowski J., De La Torre, A.; Myczynski, R. y Haczewski, G. (1987). Contribución de la Geología de la Provincia de Pinar del Río. Editorial Científico-Técnica. Ciudad de La Habana, 9-11.
- Reyes, S. (2002). Manual minimización de residuos, Dirección Técnica, Ministerio de la Industria Básica, 40 p.

- Sánchez de la Torre, E. (2006). El proyecto de pliego técnico PF-6 balasto y PF-7 sub-balasto. 1^{er} Congreso Nacional de Áridos, Zaragoza. España (Artículo, Soporte magnético).
- Segura, R. (1973). Introducción a la Petrografía. Instituto Cubano del Libro, Vedado La Habana. Cuba. Emisión URMO, Espartero, 10. Bilbao, España, 206 p.
- Velaú, L. (2012). Certificado de calidad de las areniscas meteorizadas del yacimiento Castellano, Investigaciones para la construcción, Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA), Pinar del Río.
- Vologdín, N. F., García, L., Riftin, V. M.; Scobalev, Y. M.; Illán, O. N. y Kataev, A. M. (1977). Yacimiento Castellano. (Informe sobre los resultados de los trabajos de exploración detallada del yacimiento en el período 1975-1977 con el cálculo de reservas, según el estado 1-01-77). 116-120, 136 p.

Anexos textuales

Anexo textual 1. Caracterización de los surcos muestreados.

No.	Perfil	Surco	No. de muestra	Longitud (m)	Peso inicial (kg)	X	Y	Z	Descripción de las rocas
1	P-2	S1-1_S2-1	1	6,00	17,00	194194	315075	89	Limolita fuertemente caolinizada con intercalaciones de arenisca cuarzo-feldespática, gris blancuzca, con ocre.
2	P-2	S1-1_S2-1	2	6,00	24,00	194194	315075	89	Arenisca cuarzo-feldespática cuarcitizada, con ligera caolinización, de grano fino a medio con limonita y hematita.
3	P-2	S2-2_S2-3	3	7,00	26,00	194238	315097	93	Idem a la Muestra No. 2 pero menos cuarcitizada.
4	P-2	S2-2_S3-1	4	2,50	10,00	194246	315091	92	Arenisca cuarzo-feldespática, con intercalaciones de limolita, gris blancuzca, con tonalidades pardo rojiza amarillenta, caolinizada, granos medios a finos
5	P-2	S4A-1_S4A-2	4A	2,50	15,00	194254	315089	89	Arenisca cuarzo-feldespática, a veces, muy cuarcitizada con vetillas de limonita y hematita, granos finos a medios.
6	P-2	S5-2_Surco 5	5	5,00	34,00	194269	315082	78	Arenisca cuarzo-feldespática, a veces, muy cuarcitizada con vetillas de limonita y hematita, granos finos a medios.
7	P-1	S14-2_S14-1	12	7,00	15,00	194227	315122	87	Arenisca cuarzo-feldespática de granos finos con intercalaciones de limolita y vetillas de limonitas y hematita.

8	P-1	S14-2_S14-1	13	10,00	19,00	194227	315122	87	Arenisca cuarzo-feldespática, algo cuarcitizada, de granos finos con intercalaciones de limolita y vetillas de limonitas.
9	P-1	S15-2_S15-1	14	5,00	9,00	194246	315115	85	Arenisca cuarzo-feldespática, algo cuarcitizada, de granos finos con intercalaciones de limolita y vetillas de limonitas.
10	P-1	S16-2_S-16-1	15	10,00	13,00	194261	315117	80	Arenisca cuarzo-feldespática, algo cuarcitizada, de granos finos con intercalaciones de limolita y vetillas de limonitas.
11	P-1	S16-2_S-16-1	16	10,00	5,00	194261	315117	80	Arenisca cuarzo-feldespática muy cuarcitizada, de granos medios, con numerosas vetillas entrecruzadas de limonita y hematita. Color rojizo hasta negruzco y amarillento.
12	P-1	S16-1_S17	17	6,00	10,00	194270	315117	77	Arenisca cuarzo-feldespática cuarcitizada, gris blancusca, con vetillas limonito-hematíticas.
13	P-3	S-6-1_S7-1	6	10,00	30,00	194216	315024	109	Arenisca cuarzo-feldespática cuarcitizada, granos medios a finos, con finas capas de limolita caolinizada, con vetillas de limonito-hematita, color gris blancuzco, rojizo, parduzco-amarillento.
14	P-3	S-6-1_S7-1	7	10,00	15,00	194216	315024	109	Arenisca cuarzo-feldespática cuarcitizada, granos medios a finos, con finas capas de limolita caolinizada, con vetas (hasta 1,5 m) y vetillas de limonito-hematita, color gris blancuzco, rojizo, parduzco-amarillento.

15	P-3	S8-2_S9-1	8	5,00	10,00	194237	315045	104	Arenisca cuarzo-feldespática cuarcitizada, granos medios a finos, con vetillas de limonito-hematita, color gris blancuzco, rojizo, parduzco-amarillento. A veces, deleznable.
16	P-3	S8-2_S9-1	9	10,00	15,00	194237	315045	104	Arenisca cuarzo-feldespática cuarcitizada, granos medios a finos, con vetillas de limonito-hematita, color gris blancuzco, rojizo, parduzco-amarillento. A veces, deleznable.
17	P-3	S10-1_X	10	10,00	10,00	194248	315053	96	Arenisca cuarzo-feldespática cuarcitizada, granos medios a finos a medios, capas intercaladas de limolita (hasta 3,0 m) caolinizada, con vetas (hasta 1,5 m) y vetillas de limonito-hematita, color gris blancuzco, rojizo, parduzco-amarillento.
18	P-3	S12-1_S12-2	11	8,00	14,00	194269	315059	82	Arenisca cuarzo-feldespática muy cuarcitizada, de granos medios, con numerosas vetillas entrecruzadas de limonita y hematita, color pardo-rojizo-amarillento y gris blancuzco, caolinizada, deleznable.

Anexo textual 2. Composición química de las areniscas intemperizadas del yacimiento Castellano

No. de muestra	Contenido en %											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	TiO ₂	ZrO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PPI
1	68,94	17,68	4,08	0,024	<0,017	1,04	0,84	0,014	0,04	1,12	0,25	4,02
2	78,14	13,09	2,59	0,020	<0,017	0,45	0,66	0,024	0,04	0,71	0,30	2,82
3	82,56	9,31	3,01	0,019	<0,017	0,41	0,54	0,028	0,04	0,54	0,23	2,52
4	79,58	11,03	3,03	0,019	<0,017	0,57	0,70	0,027	0,04	0,072	0,24	2,46
4A	80,84	3,24	7,75	0,024	<0,017	0,17	0,22	0,008	0,04	0,29	0,32	0,91
5	90,76	2,59	5,27	0,026	<0,017	0,086	0,12	<0,025	0,04	0,22	0,29	0,93
12	79,54	10,22	4,36	0,019	<0,017	0,42	0,62	0,010	0,04	0,67	0,21	2,62
13	72,76	15,00	4,76	0,029	<0,017	0,73	0,74	0,010	0,14	3,36	0,31	3,38
14	81,70	9,00	3,05	0,023	<0,017	0,37	0,56	0,021	0,04	0,54	0,20	2,05
15	83,26	9,47	3,97	0,020	<0,017	0,044	0,46	0,010	0,04	0,59	0,24	2,37
16	83,46	6,16	6,25	0,019	<0,017	0,035	0,051	0,010	0,04	1,33	0,25	1,49
17	87,16	4,96	5,28	0,020	<0,017	0,021	0,028	<0,025	0,04	0,78	0,13	1,68
6	77,96	9,28	5,54	0,019	<0,017	0,47	0,57	0,016	0,15	0,069	0,54	2,51
7	64,92	7,44	4,59	0,022	<0,017	0,35	0,57	0,018	0,04	0,54	0,69	3,28
8	80,09	6,41	3,73	0,023	<0,017	0,29	0,44	0,019	0,04	0,46	0,23	1,81
9	80,02	7,49	6,51	0,020	<0,017	0,4	0,50	0,024	0,04	0,56	0,37	2,36
10	83,64	8,64	2,81	0,019	<0,017	0,54	0,54	0,035	0,04	0,62	0,12	2,02
11	86,27	6,23	6,03	0,019	<0,017	0,28	0,38	0,020	0,04	0,37	0,15	1,51
Prom.	80,09	8,74	4,59	0,021	<0,017	0,371	0,47	0,016	0,05	0,713	0,28	2,26

Anexo textual 3. Composición granulométrica de la muestra M-3.


A- Resultados granulométricos de la muestra PP-1-1.

Tamices		Replica 1, Peso inicial: 500 g				Replica 2 Peso inicial: 401 g				Valor Medio % pasado
Pulg.	mm	Peso Retenido Parcial	Peso Retenido Acumul.	% Retenido Acumul.	% Pasado	Peso Retenido Parcial	Peso Retenido Acumul.	% Retenido Acumul.	% Pasado	
3/8	9,52	0	0	0	100	0	0	100	100	100
4	4,76	19,9	19,9	3,98	96	18,4	18,4	4,59	95	96
8	2,38	81,9	101,8	20,36	80	58,3	76,7	19,13	81	81
16	1,19	91,3	193,1	38,62	61	72,3	149,0	37,16	63	62
30	0,59	74,2	267,3	53,46	47	57,9	206,9	51,37	49	48
50	0,297	90,8	358,1	71,62	28	67,2	274,1	68,35	32	30
100	0,149	65,5	423,6	84,72	15	55,2	329,3	82,12	18	16 *
Fondo		76,0	499,6	-	-	71,7	401,0	-	-	-
Modulo de finura: <u>2,67</u>						Clasificación: <u>CALIDAD 1</u>				
Tamiz 200 (0.074)										
Peso inicial 364,4										
Peso final 286,0										
% Tamiz 21,51						No clasifica (6.51 % de más)				

B- Resultados granulométricos de la muestra PP-1-2.

Tamices		Réplica 1, Peso inicial: 491,2 g				Réplica 2 Peso inicial: 490 g				Valor Medio % pasado
Pulg	mm	Peso Retenido Parcial	Peso Retenido Acumul.	% Retenido Acumul.	% Pasado	Peso Retenido Parcial	Peso Retenido Acumul.	% Retenido Acumul.	% Pasado	
3/8	9,52	0	0	0	100	0	0	0	100	100
4	4,76	145,5	145,5	29,6	70	116,5	116,5	23,8	76	73 *
8	2,38	84,3	229,8	46,8	53	78,5	195,0	39,8	60	56 *
16	1,19	67,5	297,3	60,5	40	69,8	264,8	54,0	46	43 *
30	0,59	44,2	341,5	69,5	31	50,0	314,8	64,2	36	33
50	0,297	50,3	391,8	79,8	20	52,3	367,1	74,9	25	22
100	0,149	41,0	432,8	88,1	20	48,9	416,0	84,9	15	17
Fondo		60,4	493,2	-	-	72,2	488,2	-	-	-
Modulo de finura: <u>3,58</u>						Clasificación: <u>No conforme</u>				
Tamiz 200 (0,074)										
Peso inicial: 478,2										
Peso final: 424,3										
% Tamiz: 11,27						conforme				
% Desecho retenido tamiz 3/8 (9,52)										
Peso inicial: 1500										
Peso final: 1424,5										
% Tamiz: 5,03						conforme				

Anexo textual 4. Resultado de los ensayos para las cenizas de tostación de la piritita


	EMPRESA NACIONAL DE INVESTIGACIONES APLICADAS Unidad de Investigación para la Construcción		R – 1 -15-04 C								
	INFORME TÉCNICO DE ÁRIDO										
TIPO DE ÁRIDO: Ceniza de la tostación oxidante CANTERA O YACIMIENTO: Depósitos de los patios de Sulfometales MUESTRA LAB:8											
ENSAYO	UNID AD	FECHA DE ENSAYO	RESULTADO	ESPECIFICACIONES	Evaluac.						
Material más fino que el Tamiz 200	%	17/02/2012	10,0	≤ 3 para hormigones sometidos a la abrasión. ≤ 7 Todos los demás							
Partículas de arcilla	%	17/02/2012	--	$\leq 0,25$	--						
Impurezas orgánicas	Placa		--	Hasta Placa N°3	--						
Planas y Alargadas	%	17/02/2012	--	≤ 20	--						
Peso Específico Corriente	g/cm ³	17/02/2012	2,620	$\geq 2,50$	0,12						
Peso Específico Saturado	g/cm ³	17/02/2012	2,900	--	--						
Peso Específico Aparente	g/cm ³	17/02/2012	3,630	--	--						
Absorción	%	17/02/2012	11,12	$\leq 3,0$	+ 8,12						
Masa Volumétrica Suelta	kg/m ³	17/02/2012	1,515	--	--						
Masa Volumétrica Compactada	kg/m ³	17/02/2012	1,697	--	--						
Por ciento de Vacío	%	17/02/2012	35,1	--	--						
Módulo de finura	Adim.		3,21	Rango e/ 2,2 y 3,58	En rango						
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO											
TAMICES (mm)	25,4	19,1	12,7	9,52	4,76	2,38	1,19	0,59	0,297	0,149	1.1.1.1
PORCENTAJE PASADO	0	100	97	94	81	67	53	42	28	17	--
ESPECIFICACIONES	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
Observaciones: NC 186 2002. Arena. Peso específico y absorción de agua, método de ensayo. No existen especificaciones para evaluar la conformidad de este material.											
Laboratorista: Eduardo Neyra López						J de Laboratorio: Luís Vilaú Urquiaga					

Anexo textual 5. Composición química de las cenizas de tostación de la pirita


Contenido (%)	Muestra								
	1	2	14	16	19	21	22	23	24
SiO ₂	12,13	17,80	8,88	8,85	16,41	19,84	16,62	17,06	13,39
Al ₂ O ₃	1,75	2,10	1,62	1,49	2,40	2,64	2,77	3,62	3,22
Fe ₂ O ₃	57,88	48,59	46,44	44,30	50,02	48,59	55,02	57,88	44,30
MnO	0,19	0,15	0,17	0,25	0,17	0,18	0,10	0,18	0,25
CaO	0.0025	0.062	0,10	0.072	0,18	0,30	0,25	0,22	0,20
MgO	0,18	0,21	0,16	0,16	0,22	0,56	0,21	0,38	0,26
K ₂ O	0,46	0,69	0,52	0,390	0,43	0,42	0,50	0,83	0,79
TiO ₂	0,15	0,18	0,11	0,13	0,19	0,26	0,21	0,23	0,18
FeO	3,50	2,60	11,10	11,70	7,80	5,50	5,00	8,20	7,90
SO ₄	6,98	7,84	9,67	8,25	7,92	8,54	7,75	6,74	6,92
SO ₃	5,66	6,48	7,51	6,93	6,24	6,40	4,56	4,35	4,82
S _t	7,76	9,98	14,84	17,27	10,39	10,28	9,21	10,96	11,56
PPI	10,81	13,29	17,72	18,75	13,16	12,78	12,82	12,95	13,11

Anexo textual 6. Resultado de los ensayos de los cementos

A. Cemento PP-250

	Unidad de Investigaciones para la Construcción Pinar del Río Laboratorio de Materiales para la Construcción MODELO ENSAYOS DE CEMENTO				Re-1-15-03. A Nº de entrada: 169	
Obra	UEB Geólogo Minera			Empresa	Prueba de laboratorio	
Fábrica						
Marca del cemento	PP - 250			Bolsa: X	A granel:	
Fecha de entrada				Tamaño del lote		
Resultados de los Ensayos						
Peso específico (g/cm ³)	3,07			Finura Blaine (cm ² /g)	3323	
Consistencia normal (%)	26,5			1.2 Finura Tamiz 1,70	1.2	4
Tiempo de fraguado (h)	Inicial: 2:10			1.2	Final: 4:25	
1.2 Fecha de Mezclado: 10/02/2012						
Resistencia a la Flexo-tracción (MPa)						
3 días:			7 días: 17/02/2012		28 días: 9/03/2012	
No	Lectura (kgf)	Rf	Lectura (kgf)	Rf	Lectura (kgf)	Rf
1	--	--	3890	3,6	6600	6,2
2	--	--	4280	4,0	5710	5,3
3	--	--	4020	3,8	5820	5,4
Media	--	--	--	3,8	--	5,6
Resistencia a la compresión (MPa)						
3 días:			7 días: 17/02/2012		28 días: 9/03/2012	
No	Lectura (kgf)	Rc	Lectura (kgf)	Rc	Lectura (kgf)	Rc
1	--	--	3900	24,4	4620	28,8
2	--	--	3900	24,4	4600	28,7
3	--	--	3600	22,5	6000	37,5
4	--	--	3780	23,6	6000	37,5
5	--	--	3700	23,1	5380	33,6
6	--	--	3780	23,6	4120	25,7
Media	--	--	--	23,6	--	31,9
Temperatura de ensayo: (°C)				Humedad de ensayo (%)		
Observaciones del laboratorio: CONFORME NC: 97: 2001; 95: 2001; 54-396-1987; 97: 2001; 95: 2011						
			Nombre y Apellidos			
Toma de muestra					--	
Laboratorista			Alejandro León Gómez		--	
J'. Laboratorio			Luis Vilaú Urquiaga		--	

B. Cemento P-350

		Unidad de Investigaciones para la Construcción Pinar del Río Laboratorio de Materiales para la Construcción		Re-1-15-03. A Nº de entrada: 163		
Obra	UEB Geólogo Minera			Empresa	Prueba de laboratorio	
Fábrica						
Marca del cemento	P- 350		Bolsa: X	A granel:		
Fecha de entrada			Tamaño del lote			
Resultados de los Ensayos						
Peso específico (g/cm ³)	3,12		Finura Blaine (cm ² /g)	3,400		
Consistencia normal (%)	26,5		Finura tamiz 170 (%)	1.2 1.5		
Tiempo de fraguado (h)	Inicial: 1:10			1.2 Final: 2:20		
1.2 Fecha de mezclado: 10/02/2012						
Resistencia a la Flexo-tracción (MPa)						
3 días:			7 días: 17/02/2012		28 días: 9/03/2012	
No	Lectura (kgf)	Rf	Lectura (kgf)	Rf	Lectura (kgf)	Rf
1	--	--	5692	5,3	5717	5,3
2	--	--	5547	5,2	5830	5,4
3	--	--	5604	5,2	5910	5,5
Media	--	--	--	5,2	--	5,4
Resistencia a la Compresión (MPa)						
3 días:			7 días: 17/02/2012		28 días: 9/03/2012	
No	Lectura (kgf)	Rc	Lectura (kgf)	Rc	Lectura (kgf)	Rc
1	--	--	4860	30,4	6680	41,7
2	--	--	5540	34,6	6500	40,4
3	--	--	5220	32,6	6940	43,3
4	--	--	5700	35,6	6670	41,7
5	--	--	5540	34,6	6810	42,5
6	--	--	5420	33,9	6780	42,4
Media	--	--	--	33,6	--	42,0
Temperatura de ensayo: (°C)				Humedad de ensayo (%)		
Observaciones del laboratorio:						
CONFORME						
NC: 97: 2011; 95: 2001; 54-396-1987; 97: 2001; 95: 2011						
			Nombre y Apellidos			
Toma de muestra						--
Laboratorista			Alejandro León Gómez			--
J'. Laboratorio			Luís Vilau Urquiaga			--

Anexo textual 7. Dosificaciones para morteros

A. Cemento PP- 250 y arenisca del yacimiento Castellano con ceniza de tostación de pirita oxidada, pasada por el tamiz 4,76 mm.

Tamiz 4,76 mm															
Proporción	Cemento PP-250		Arena Castellanos		Ceniza		Agua		Peso 1 amasada	Densidad Material	Cantidad amasadas para 1 m³	Consumo por m³			
	g	kg	g	kg	g	kg	g	litros	kg	kg/m³		Cemento	Arena	ceniza	Agua
1:3:1	800	0,800	2400	2,400	800	0,800	790	0,790	4,79	2183	455,74	365	1094	365	360
1:4:1	600	0,600	2400	2,400	600	0,600	730	0,730	4,33	2164	499,77	300	1199	300	365
1:5:1	500	0,500	2500	2,500	500	0,500	695	0,695	4,20	2129	507,51	254	1269	254	353
1:6:1	400	0,400	2400	2,400	400	0,400	645	0,645	3,85	2108	548,24	219	1316	219	354
1:7:1	400	0,400	2800	2,800	400	0,400	700	0,700	4,30	2140	497,67	199	1393	199	348
1:8:1	400	0,400	3200	3,200	400	0,400	775	0,775	4,78	2134	446,91	179	1430	179	346

B. Cemento PP- 250 y arenisca del yacimiento Castellano con ceniza de tostación de pirita oxidada, pasada por el tamiz 2,38 mm.

Tamiz 2,38 mm															
Proporción	Cemento PP-250		Arena Castellanos		Ceniza		Agua		Peso 1 amasada	Densidad Material	Cantidad amasadas para 1 m³	Consumo por m³			
	g	kg	g	kg	g	kg	g	litros	kg	kg/m³		Cemento	Arena	ceniza	Agua
1:3:1	800	0,800	2400	2,400	800	0,800	942	0,942	4,94	2077	420,28	336	1009	336	396
1:4:1	600	0,600	2400	2,400	600	0,600	870	0,870	4,47	2090	467,56	281	1122	281	407
1:5:1	500	0,500	2500	2,500	500	0,500	835	0,835	4,34	2203	508,19	254	1270	254	424
1:6:1	400	0,400	2400	2,400	400	0,400	760	0,760	3,96	2053	518,43	207	1244	207	394
1:7:1	400	0,400	2800	2,800	400	0,400	850	0,850	4,45	2053	461,35	185	1292	185	392
1:8:1	400	0,400	3200	3,200	400	0,400	932	0,932	4,93	2034	412,41	165	1320	165	384

C. Cemento PP- 250 y arenisca del yacimiento Castellano con ceniza de tostación de pirita oxidada, pasada por el tamiz 1,19 mm.

Tamiz 1,19 mm															
Proporción	Cemento P-250		Arena Castellanos		Ceniza		Agua		Peso 1 amasada	Densidad material	Cantidad amasadas para 1 m³	Consumo por m³			
	g	kg	g	kg	g	kg	g	litros	kg	kg/m³		Cemento	Arena	Ceniza	Agua
1:3:1	700	0,700	2100	2,100	700	0,700	900	0,900	4,40	2052	466,36	326	979	326	420
1:4:1	600	0,600	2400	2,400	600	0,600	942	0,942	4,54	2036	448,26	269	1076	269	422
1:5:1	500	0,500	2500	2,500	500	0,500	938	0,938	4,44	2010	452,91	226	1132	226	425
1:6:1	400	0,400	2400	2,400	400	0,400	860	0,860	4,06	1969	484,98	194	1164	194	417
1:7:1	350	0,350	2450	2,450	350	0,350	850	0,850	4,00	1974	493,50	173	1209	173	419
1:8:1	300	0300	2400	2,400	300	0,300	780	0,780	3,78	1990	526,46	158	1263	158	411

D. Cemento P – 350 y arenisca del yacimiento Castellano con ceniza de tostación de pirita oxidada, pasada por el tamiz 4,76 mm.

Tamiz 4.76 mm															
Proporción	Cemento P-350		Arena Castellanos		Ceniza		Agua		Peso 1 amasada	Densidad material	Cantidad amasadas para 1 m³	Consumo por m³			
	g	kg	g	kg	g	kg	g	litros	kg	kg/m³		Cemento	Arena	Ceniza	Agua
1:3:1	800	0,800	2400	2,400	800	0,800	790	0,790	4,79	2183	455,74	365	1094	365	360
1:4:1	600	0,600	2400	2,400	600	0,600	730	0,730	4,33	2164	499,77	300	1199	300	365
1:5:1	500	0,500	2500	2,500	500	0,500	695	0,695	4,20	2129	507,51	254	1269	254	353
1:6:1	400	0,400	2400	2,400	400	0,400	645	0,645	3,85	2108	548,24	219	1316	219	354
1:7:1	400	0,400	2800	2,800	400	0,400	700	0,700	4,30	2140	497,67	199	1393	199	348
1:8:1	400	0,400	3200	3,200	400	0,400	775	0,775	4,78	2134	446,91	179	1430	179	346

E. Cemento P – 350 y arena del yacimiento Castellano con ceniza de tostación de pirita oxidada, pasada por el tamiz 2,38 mm.

Tamiz 2,38 mm															
Proporción	Cemento P-350		Arena Castellanos		Ceniza		Agua		Peso 1 amasada	Densidad Material	Cantidad amasadas para 1 m³	Consumo por m³			
	g	kg	g	kg	g	kg	g	litros	kg	kg/m³		Cemento	Arena	Ceniza	Agua
1:3:1	800	0,800	2400	2,400	800	0,800	942	0,942	4,94	2077	420,28	336	1009	336	396
1:4:1	600	0,600	2400	2,400	600	0,600	870	0,870	4,47	2090	467,56	281	1122	281	407
1:5:1	500	0,500	2500	2,500	500	0,500	835	0,835	4,34	2203	508,19	254	1270	254	424
1:6:1	400	0,400	2400	2,400	400	0,400	760	0,760	3,96	2053	518,43	207	1244	207	394
1:7:1	400	0,400	2800	2,800	400	0,400	850	0,850	4,45	2053	461,35	185	1292	185	392
1:8:1	400	0,400	3200	3,200	400	0,400	932	0,932	4,93	2034	412,41	165	1320	165	384

F. Cemento P – 350 y arenisca del yacimiento Castellano con ceniza de tostación de pirita oxidada con ceniza de tostación de pirita oxidada, pasada por el tamiz 2,38 mm.

Tamiz 2,38 mm															
Proporción	Cemento P-350		Arenisca Castellanos		Ceniza		Agua		Peso 1 amasada	Densidad Material	Cantidad amasadas para 1 m³	Consumo por m³			
	g	kg	g	kg	g	kg	g	litros	kg	kg/m³		Cemento	Arena	Ceniza	Agua
1:6:1	270	0,270	1800	1,800	30	0,030	500	0,500	2,60	2031	781,15	211	1406	23	391
1:7:1	270	0,270	2100	2,100	30	0,030	560	0,560	2,96	2000	675,68	182	1419	20	378
1:8:1	270	0,270	2400	2,400	30	0,030	640	0,640	3,34	1984	594,01	160	1426	18	380
1:9:1	270	0,270	2700	2,700	30	0,030	700	0,700	3,70	2035	550,00	149	1485	17	385

G. Cemento P – 350 y arenisca del yacimiento Castellano con ceniza de tostación de pirita oxidada, pasada por el tamiz 2,38 mm.


Tamiz 2.38 mm															
Proporción	Cemento P-350		Arenisca Castellanos		Ceniza		Agua		Peso 1 amasada	Densidad Material	Cantidad amasadas para 1 m³	Consumo por m³			
	g	kg	g	kg	g	kg	g	litros	kg	kg/m³		Cemento	Arena	Ceniza	Agua
1:6:1	270	0,270	1800	1,800	30	0,030	500	0,500	2,60	2035	782,69	211	1409	23	391
1:7:1	270	0,270	2100	2,100	30	0,030	555	0,555	2,96	2017	682,57	184	1433	20	379
1:8:1	270	0,270	2400	2,400	30	0,030	610	0,610	3,31	2040	616,31	166	1479	18	376
1:9:1	270	0,270	2700	2,700	30	0,030	690	0,690	3,69	2027	549,32	148	1483	16	379

H. Cemento P – 350 y arenisca del yacimiento Castellano con ceniza de tostación de pirita oxidada, pasada por el tamiz 1,19 mm.

Tamiz 1,19 mm															
Proporción	Cemento P-350		Arena Castellanos		Ceniza		Agua		Peso 1 amasada	Densidad Material	Cantidad amasadas para 1 m³	Consumo por m³			
	g	kg	g	kg	g	kg	g	litros	kg	kg/m³		Cemento	Arena	ceniza	Agua
1:3:1	700	0,700	2100	2,100	700	0,700	900	0,900	4,40	2052	466,36	326	979	326	420
1:4:1	600	0,600	2400	2,400	600	0,600	942	0,942	4,54	2036	448,26	269	1076	269	422
1:5:1	500	0,500	2500	2,500	500	0,500	938	0,938	4,44	2010	452,91	226	1132	226	425
1:6:1	400	0,400	2400	2,400	400	0,400	860	0,860	4,06	1969	484,98	194	1164	194	417
1:7:1	350	0,350	2450	2,450	350	0,350	850	0,850	4,00	1974	493,50	173	1209	173	419
1:8:1	300	0,300	2400	2,400	300	0,300	780	0,780	3,78	1990	526,46	158	1263	158	411

Anexo textual 8. Dosificaciones óptimas para mortero

A. Aplicaciones de dosificaciones de morteros con ceniza de tostación de pirita oxidada.

<div>  Dosificaciones de Morteros de Albañilería. </div>									Ordinario Ejemplar Hoja 1		
No. Mortero	Materiales	Proporciones Volumétricas			Consumo kg/m ³				Densidad kg/m ³	Rc MPa	Requisitos del Mortero
		Cemento	Arena	Recebo	Cemento	Arena	Recebo	Agua			
1	P350+Arenisca Castellano+Ceniza de Tostación	1	3	1	365	1094	365	360	2183	25,5	Fluidez-94-100 mm Arena cernida p/ tamiz 4.76 mm
2	P350+Arenisca Castellano+Ceniza de Tostación	1	4	1	300	1199	300	365	2164	16,8	
3	P350+Arenisca Castellano+Ceniza de Tostación	1	5	1	254	1269	254	353	2129	13,5	
4	P350+Arenisca Castellano+Ceniza de Tostación	1	6	1	219	1316	219	354	2108	12,7	
5	P350+Arenisca Castellano+Ceniza de Tostación	1	7	1	199	1393	199	348	2140	10,0	
6	P350+Arenisca Castellano+Ceniza de Tostación	1	8	1	179	1430	179	346	2134	9,5	
7	P350+Arenisca Castellano+Ceniza de Tostación	1	3	1	336	1009	336	396	2077	20,8	Fluidez-95-100 mm Arena cernida p/ tamiz 2.38 mm
8	P350+Arenisca Castellano+Ceniza de Tostación	1	4	1	281	1122	281	407	2090	15,7	
9	P350+Arenisca Castellano+Ceniza de Tostación	1	5	1	254	1270	254	424	2203	11,5	
10	P350+Arenisca Castellano+Ceniza de Tostación	1	6	1	207	1244	207	394	2053	8,8	
11	P350+Arenisca Castellano+Ceniza de Tostación	1	7	1	185	1292	185	392	2053	8,3	
12	P350+Arenisca Castellano+Ceniza de Tostación	1	8	1	165	1320	165	384	2034	7,4	
13	P350+Arenisca Castellano+Ceniza de Tostación	1	3	1	326	979	326	420	2052	15,4	Fluidez-95-100 mm Arena cernida p/ tamiz 1.19 mm
14	P350+Arenisca Castellano+Ceniza de Tostación	1	4	1	269	1076	269	422	2036	11,2	
15	P350+Arenisca Castellano+Ceniza de Tostación	1	5	1	226	1132	226	425	2010	7,9	
16	P350+Arenisca Castellano+Ceniza de Tostación	1	6	1	194	1164	194	417	1969	6,0	
17	P350+Arenisca Castellano+Ceniza de Tostación	1	7	1	173	1209	173	419	1974	4,8	
18	P350+Arenisca Castellano+Ceniza de Tostación	1	8	1	158	1263	158	411	1990	4,3	

Las dosificaciones que se reflejan en la tabla anterior se resumen con las aplicaciones óptimas que siguen:

Morteros óptimos para muros portantes de bloques y ladrillos (6)

Morteros óptimos para muros no portantes de bloques y ladrillos (6)

Morteros óptimos para pisos (4)

Morteros óptimos para resano grueso en exteriores (12)

Morteros óptimos para resano grueso en interiores (12)

Morteros óptimos para resano fino en exteriores (16)

Morteros óptimos para resano fino en interiores (18)

B. Aplicaciones de dosificaciones de morteros de albañilería sin aditivos, utilizada en elementos de pared.



Dosificaciones de Morteros de Albañilería.							Ordinario Ejemplar Hoja 1		
No. Mortero	Materiales	Proporciones Volumétricas		Consumo kg/m³			Densidad kg/m³	Rc MPa	Requisitos del Mortero
		Cemento	Arena	Cemento	Arena	Agua			
1	P350+Arenisca Castellano	1	3	445	1334	355	2134	24,1	Fluidez-95-100 mm Arena cernida p/ tamiz 4.76 mm
2	P350+Arenisca Castellano	1	4	356	1423	351	2129	17,6	
3	P350+Arenisca Castellano	1	5	291	1455	354	2100	12,8	
4	P350+Arenisca Castellano	1	6	244	1464	366	2074	7,5	
5	P350+Arenisca Castellano	1	7	212	1483	360	2055	6,3	
6	P350+Arenisca Castellano	1	8	191	1525	353	2068	5,1	
7	P350+Arenisca Castellano	1	3	423	1270	384	2077	19,7	Fluidez-95-105 mm Arena cernida p/ tamiz 2.38 mm
8	P350+Arenisca Castellano	1	4	337	1346	382	2065	13,5	
9	P350+Arenisca Castellano	1	5	278	1390	380	2048	9,9	
10	P350+Arenisca Castellano	1	6	239	1435	378	2052	7,3	
11	P350+Arenisca Castellano	1	7	202	1417	390	2009	4,6	
12	P350+Arenisca Castellano	1	8	185	1480	361	2026	4,1	
13	P350+Arenisca Castellano	1	3	411	1234	396	2041	16,1	Fluidez-95-100 mm Arena cernida p/ tamiz 1.19 mm
14	P350+Arenisca Castellano	1	4	329	1316	407	2052	11,7	
15	P350+Arenisca Castellano	1	5	275	1375	389	2039	9,2	
16	P350+Arenisca Castellano	1	6	230	1377	399	2006	7,0	
17	P350+Arenisca Castellano	1	7	198	1384	405	1987	4,5	
18	P350+Arenisca Castellano	1	8	177	1414	406	1997	3,7	

Las dosificaciones que se reflejan en la tabla anterior se resumen con las aplicaciones óptimas que siguen:

Morteros óptimos para muros portantes de bloques y ladrillos (5)

Morteros óptimos para muros no portantes de bloques y ladrillos (6)

Morteros óptimos para pisos (3)

Morteros óptimos para resano grueso en exteriores (10)

Morteros óptimos para resano grueso en interiores (12)

Morteros óptimos para resano fino en exteriores (16)

Morteros óptimos para resano fino en interiores (18)

C. Aplicaciones de dosificaciones de morteros de albañilería con recebo utilizado en elementos de pared.

No. Mortero	Materiales	Proporciones Volumétricas			Consumo kg/m ³				Densidad kg/m ³	Rc MPa	Requisitos del Mortero
		Cemento	Arena	Recebo	Cemento	Arena	Recebo	Agua			
1	P350+Arenisca Castellano+Recebo	1	3	1	338	1014	338	380	2071	1,3	Fluidez-94-100 mm Arena cernida p/ tamiz 4.76 mm
2	P350+Arenisca Castellano+Recebo	1	4	1	284	1137	284	351	2056	9,3	
3	P350+Arenisca Castellano+Recebo	1	5	1	245	1226	245	348	2065	8,8	
4	P350+Arenisca Castellano+Recebo	1	6	1	224	1345	224	350	2143	6,4	
5	P350+Arenisca Castellano+Recebo	1	7	1	191	1340	191	333	2056	5,2	
6	P350+Arenisca Castellano+Recebo	1	8	1	169	1355	169	351	2045	3,7	
7	P350+Arenisca Castellano+Recebo	1	3	1	330	991	330	395	2047	11	Fluidez-98-100 mm Arena cernida p/ tamiz 2.38 mm
8	P350+Arenisca Castellano+Recebo	1	4	1	268	1073	268	380	1990	9,6	
9	P350+Arenisca Castellano+Recebo	1	5	1	228	1140	228	385	1981	5,4	
10	P350+Arenisca Castellano+Recebo	1	6	1	202	1212	202	384	2000	4,2	
11	P350+Arenisca Castellano+Recebo	1	7	1	179	1253	179	398	2010	3,2	
12	P350+Arenisca Castellano+Recebo	1	8	1	165	1320	165	371	2021	2,7	
13	P350+Arenisca Castellano+Recebo	1	3	1	306	918	306	405	1935	6,8	Fluidez-93-100 mm Arena cernida p/ tamiz 1.19 mm
14	P350+Arenisca Castellano+Recebo	1	4	1	248	991	248	413	1899	5,2	
15	P350+Arenisca Castellano+Recebo	1	5	1	219	1097	219	416	1951	4,1	
16	P350+Arenisca Castellano+Recebo	1	6	1	190	1138	190	417	1935	3,7	
17	P350+Arenisca Castellano+Recebo	1	7	1	176	1235	176	406	1994	3,1	
18	P350+Arenisca Castellano+Recebo	1	8	1	157	1254	157	421	1988	2,3	

Las aplicaciones que se reflejan en la tabla anterior se resumen con las aplicaciones óptimas que siguen:

Morteros óptimos para muros portantes de bloques y ladrillos (5).

Morteros óptimos para muros no portantes de bloques y ladrillos (6).

Morteros óptimos para piso (3).

Morteros óptimos para resano grueso en exteriores (10)

Morteros óptimos para resano grueso en interiores (12)

Morteros óptimos para resano fino en exteriores (16)

Morteros óptimos para resano grueso en interiores (18)

Anexo textual 9. Cálculo del volumen de areniscas intemperizadas

Upper Surface

Grid File Name:	J:\Cuniok\BD Areniscas\ARENISCA 70 limitado.grd
Grid Size:	100 rows x 100 columns
X Minimum:	193651.0955
X Maximum:	194511.2749
X Spacing:	8.6886808080807
Y Minimum:	314459.6763
Y Maximum:	315317.6568
Y Spacing:	8.6664696969697
Z Minimum:	69.775224896673
Z Maximum:	110.39689489422

Lower Surface

Level Surface defined by $Z = 70$

Volumes

Z Scale Factor:	1
-----------------	---

Total Volumes by:

Trapezoidal Rule:	373470.9903349
Simpson's Rule:	379387.61667031
Simpson's 3/8 Rule:	370662.52926285

Cut & Fill Volumes

Positive Volume [Cut]:	373492.1091719
Negative Volume [Fill]:	21.118837008578
Net Volume [Cut-Fill]:	373470.99033489

Areas

Planar Areas

Positive Planar Area [Cut]:	21994.951063625
Negative Planar Area [Fill]:	30.354198362828
Blanked Planar Area:	715991.84643971
Total Planar Area:	738017.1517017

Surface Areas

Positive Surface Area [Cut]:	24032.102893043
Negative Surface Area [Fill]:	30.473354328671

Anexo textual 10. Cálculo de los recursos de areniscas y limolitas intemperizadas.

Bloque	Área (m ²)		Volumen total hasta la cota +70 m (m ³)	Volumen de areniscas (m ³)	Volumen de limolitas (m ³)	Peso volumétrico de las areniscas (t/m ³)	Peso volumétrico de las limolitas (t/m ³)	Tonelaje de areniscas	Tonelaje de limolitas
	Plana	superficial							
No. 1	21994,95	24032,10	373492,11	261444,48	112047,63	2,5	2,01	653611,2	258072,86