



**REPÚBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO  
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”**

**FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA  
DEPARTAMENTO DE MINAS**

**PROCEDIMIENTO PARA LA ELECCIÓN DEL MÉTODO DE ARRANQUE DE LAS  
ROCAS EN CANTERAS PARA ÁRIDOS**

**TESIS EN OPCIÓN AL GRADO CIENTÍFICO DE DOCTOR  
EN CIENCIAS TÉCNICAS**

**NAISMA HERNÁNDEZ JATIB**

**MOA- 2015**

**REPÚBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO  
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”**

**FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA  
DEPARTAMENTO DE MINAS**

**PROCEDIMIENTO PARA LA ELECCIÓN DEL MÉTODO DE ARRANQUE DE LAS  
ROCAS EN CANTERAS PARA ÁRIDOS**

**TESIS EN OPCIÓN AL GRADO CIENTÍFICO DE DOCTOR  
EN CIENCIAS TÉCNICAS**

**Autora: Prof. Aux., Ing. Naisma Hernández Jatib, M. Sc.**

**Tutores: Prof. Tit., Ing. José Otaño Noguel, Dr. C.**

**Prof. Tit., Ing. Yuri Almaguer Carmentate, Dr. C.**

**Prof. Tit., Ing. Yiezenia Rosario Ferrer, Dra. C.**

**MOA- 2015**

## **AGRADECIMIENTOS**

**A La Revolución Cubana** porque me brindó la posibilidad de formarme como Ingeniero Mecánico y de realizar estudios de maestría y doctorado en la especialidad de Minería.

**También dejo constancia de mi agradecimiento:**

**A mis padres, hermano e hijo**, por sus esfuerzos para que pudiera formarme como una profesional y por su constante apoyo cuando las dificultades me hacían dudar de la posibilidad del triunfo.

**A mi querido esposo**, José Alberto Batista Rodríguez, por las reiteradas ayudas ofrecidas durante el desarrollo de la investigación y por sus atinadas y acertadas observaciones en la esfera científica.

**A mis tutores de tesis:** los doctores José Otaño Nogueal, Yuri Almaguer Carmenate y Yiezenia Rosario Ferrer, por sus valiosas sugerencias y por su generosidad intelectual.

**A Silvia y Gladys** les tengo una deuda especial. Su apoyo espiritual y moral brindado incondicionalmente, me ayudaron a salvar muchos escollos y a resistir momentos difíciles. Gracias a su colaboración pude llevar esta investigación.

**A mis hermanos en la fe:** Moisés, Sonia, Jesús, Marilyn y Alfredito por permitirme ser uno más de ellos, por el apoyo incondicional que me brindan, por sus inagotables demostraciones de aprecio y cariño, por su constante preocupación para que todo salga bien y por siempre estar ahí cuando los necesito.

**A la doctora** Alina Rodríguez, porque aceptó revisar la Tesis a pesar de las obligaciones y responsabilidades; por su tiempo de descanso y por la voluntad de ayudar que mostró siempre que le busqué.

**A la doctora** Elsi A. Ferrer, muchas gracias también por las ideas compartidas y el afecto demostrado a lo largo de todo este tiempo, desafiando cualquier tentativa de aislamiento y bloqueo.

**A mis colegas de departamento**, por su inestimable colaboración con sus oportunas sugerencias, **en especial**, a la doctora Mayda Ulloa. Siento similar gratitud hacia los doctores Ramón Polanco y Roberto Watson.

**A mi primo** Dixán Serret, sin el invaluable apoyo que me ofreció hubiera sido imposible realizar la presente investigación.

**A mi amigo** Yoalbys y a su esposa, por la amistad sincera y desinteresada que me brindan y por las reiteradas ayudas ofrecidas durante estos años.

**A mi prima** Julieta Aguilera, por el tiempo que dedicó a la revisión del trabajo y por las recomendaciones realizadas, las cuales sirvieron para enriquecer el informe.

**A mis colegas** Teresa Hernández, Yadira y Edil por la ayuda que me proporcionaron con la impresión.

**A los especialistas** Libán Fernández, Rodney, Olven Falcó, Cardé, Lisbán, Raidel y demás de las empresas de materiales de construcción y Explomat de las provincias Granma, Holguín y Santiago de Cuba; por su asistencia inestimable para la consulta de las fuentes documentales empleadas en este trabajo.

**A los colegas** Neidys y Rams, por las recomendaciones realizadas, las cuales sirvieron para enriquecer el informe.

A todas aquellas personas e instituciones que, de una u otra manera, contribuyeron con el desarrollo de esta investigación.

**A las personas nombradas y a quienes inconscientemente no he recordado.**

**A todas, muchísimas gracias y mi eterno agradecimiento.**

**La autora**

## **SÍNTESIS**

El objetivo general de la presente investigación es elaborar un procedimiento para la elección del método de arranque de las rocas en canteras para áridos, considerando las características geológicas y geomecánicas del macizo rocoso. Con la ayuda del criterio de expertos se identificaron los índices geológicos y geomecánicos que determinan un sistema satisfactorio de excavabilidad del macizo rocoso.

La integración de los índices geológicos y geomecánicos, así como el establecimiento de los dominios geomecánicos para la selección del método de arranque se realiza a través del diagrama desarrollado en la presente investigación, que consta de 5 pasos: análisis de las características geológicas, propiedades másticas y mecánicas, evaluación geomecánica del macizo rocoso, determinación de los dominios geomecánicos y elección del método de arranque. De esta forma queda establecido el procedimiento para la elección del método de arranque de las rocas en canteras para áridos.

La aplicación del procedimiento en tres casos de estudio seleccionados con diferentes condiciones geológicas y geomecánicas, permitió determinar que en tres dominios existe coincidencia entre el método de voladura aplicado y el método obtenido a través del diagrama, mientras que en otros 3 dominios se demostró que el arranque por métodos mecánicos, recomendado por el procedimiento, resulta más eficiente que el empleado actualmente.

| <b>ÍNDICE</b>  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>1</b>    |
| <b>CAPÍTULO I. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA .....</b>                             | <b>9</b>    |
| 1.1. Introducción .....  | 9           |
| 1.2. Métodos de arranque de las rocas .....  | 9           |
| 1.3. El macizo rocoso .....  | 11          |
| 1.4. Clasificación de los macizos rocosos según su excavabilidad .....                           | 12          |
| 1.5. Actualidad y situación del tema en Cuba .....   | 26          |
| 1.6. Conclusiones .....  | 27          |
| <b>CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO PARA LA ELECCIÓN DEL MÉTODO DE<br/>ARRANQUE DE LAS ROCAS .....</b> | <b>28</b>   |
| 2.1. Introducción .....  | 28          |
| 2.2. Identificación de los parámetros que influyen en la excavabilidad de las<br>rocas .....     | 28          |
| 2. 3. Método Delphi .....  | 30          |
| 2.4 Clasificación de los parámetros en índices geológicos y geomecánicos<br>.....                | 33          |
| 2.5 Estructura general del procedimiento .....   | 34          |
| 2.5.1 Paso I. Determinación del tipo de roca y análisis estructural del<br>macizo rocoso .....   | 35          |
| 2.5.2 Paso II. Valoración de las propiedades másicas y mecánicas de las<br>rocas .....           | 37          |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.5.3 Paso III. Evaluación geomecánica del macizo rocoso .....    | 40        |
| 2.5.4 Paso IV. Determinación de dominios geomecánicos.....        | 43        |
| 2.5.5 Paso V. Elección del método de arranque .....               | 50        |
| 2.6 Diagrama del procedimiento propuesto .....                    | 53        |
| 2.7 Conclusiones .....  | 56        |
| <b>CAPÍTULO III. VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO .....</b> | <b>57</b> |
| 3.1 Introducción .....  | 57        |
| 3.2 Primer caso de estudio: El Cacao .....                        | 58        |
| 3.2.1 Características geológicas del yacimiento .....             | 58        |
| 3.2.2 Propiedades másicas y mecánicas de las rocas.....           | 62        |
| 3.2.3 Evaluación geomecánica del macizo rocoso.....               | 63        |
| 3.2.4 Dominios geomecánicos y método de arranque.....             | 64        |
| 3.2.5 Validación del método del procedimiento propuesto .....     | 68        |
| 3.3 Segundo caso de estudio: Pílon .....                          | 68        |
| 3.3.1 Características geológicas del yacimiento .....             | 68        |
| 3.3.2 Propiedades másicas y mecánicas de las rocas.....           | 73        |
| 3.3.3 Índices geomecánicos ( <i>RMR</i> ).....                    | 74        |
| 3.3.4 Dominios geomecánicos y método de arranque.....             | 75        |
| 3.3.5 Validación del método del procedimiento propuesto .....     | 78        |
| 3.4 Tercer caso de estudio: Los Guaos .....                       | 78        |
| 3.4.1 Características geológicas del yacimiento .....             | 78        |
| 3.4.2 Propiedades másicas y mecánicas de las rocas.....           | 82        |
| 3.4.3 Índices geomecánicos ( <i>RMR</i> ).....                    | 82        |
| 3.4.4 Dominios geomecánicos y método de arranque.....             | 83        |
| 3.4.5 Validación del método del procedimiento propuesto .....     | 86        |
| 3.5 Conclusiones .....  | 86        |
| <b>CONCLUSIONES .....</b>   | <b>87</b> |
| <b>RECOMENDACIONES .....</b>                                      | <b>88</b> |
| <b>REFERENCIAS BILIOGRÁFICAS .....</b>                            | <b>89</b> |

| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>   | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| <b>Figura 1.1.</b> Clasificación propuesta por Louis (1974).   | -13-        |
| <b>Figura 1.2.</b> Clasificación propuesta por Romana (1981).  | -14-        |
| <b>Figura 1.3.</b> Clasificación propuesta por Abdullatif y Crudden (1983).                                | -16-        |
| <b>Figura 1.4.</b> Clasificación propuesta por Franklin (1977).  | -18-        |
| <b>Figura 1.5.</b> Método gráfico de excavabilidad de la roca (tomado de Karpuz, 1990).                    | -24-        |
| <b>Figura 2.1.</b> Estructura general del procedimiento.   | -35-        |
| <b>Figura 2.2.</b> Esquema para la obtención de los dominios geomecánicos                                  | -48-        |
| <b>Figura 2.3.</b> Diagrama del procedimiento propuesto.   | -55-        |
| <b>Figura 3.1.</b> Ubicación de los casos de estudio.  | -58-        |
| <b>Figura 3.2.</b> Plano geológico del extremo noreste de la provincia Granma.                             | -59-        |
| <b>Figura 3.3.</b> Plano geológico del yacimiento El Cacao, modificado del plano geológico del yacimiento. | -60-        |
| <b>Figura 3.4.</b> Diagrama de contorno y planos del agrietamiento de El Cacao.                            | -61-        |
| <b>Figura 3.5.</b> Diagrama de rosetas del agrietamiento en El Cacao.                                      | -62-        |



|   |      |
|---|------|
| <b>Figura 3.6.</b> Plano de calidad geomécanica del macizo rocoso del yacimiento El Cacao.  | -64- |
| <b>Figura 3.7.</b> Plano de dominios geomecánicos del yacimiento El Cacao, modificado del plano geológico del yacimiento.                       | -67- |
| <b>Figura 3.8.</b> Plano geológico del área de estudio, yacimiento Pilón, modificado del plano geológico del yacimiento.                        | -70- |
| <b>Figura 3.9.</b> Cavernas desarrolladas en las calizas del yacimiento Pilón.  | -71- |
| <b>Figura 3.10.</b> Contacto tectónico entre las calizas de la Fm Bitirí (encima) y las serpentinitas (debajo), ambas fuertemente tectonizadas. | -71- |
| <b>Figura 3.11.</b> Diagrama de contorno y planos del agrietamiento.  | -72- |
| <b>Figura 3.12.</b> Diagrama de rosetas del agrietamiento.  | -73- |
| <b>Figura 3.13.</b> Comportamiento de la Rc en el yacimiento Pilón.   | -74- |
| <b>Figura 3.14.</b> Plano de calidad geomecánica del macizo rocoso del yacimiento Pilón.  | -75- |
| <b>Figura 3.15.</b> Dominios geomecánicos en el yacimiento Pilón.   | -77- |
| <b>Figura 3.16.</b> Plano geológico del yacimiento Los Guaos.   | -80- |
| <b>Figura 3.17.</b> Diagrama de contorno y planos del agrietamiento en el yacimiento Los Guaos.   | -81- |
| <b>Figura 3.18.</b> Diagrama de rosetas del agrietamiento en el yacimiento Los Guaos.   | -81- |
| <b>Figura 3.19.</b> Plano de calidad geomecánica de macizo del yacimiento Los Guaos.  | -84- |
| <b>Figura 3.20.</b> Dominio geomecánico del yacimiento Los Guaos.   | -85- |

| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b>   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>Tabla 1.1.</b> Clasificación de los macizos rocosos respecto a la excavabilidad (Romana, 1981).  | -14-        |
| <b>Tabla 1.2.</b> Valoración de la excavabilidad de los macizos rocosos, en función de los valores del índice de excavabilidad propuesto por Scoble y Muftuoglu (1984). | -19-        |
| <b>Tabla 1.3.</b> Factores de ponderación de los parámetros del índice de volabilidad, (Lilly, 1986, 1992).   | -20-        |
| <b>Tabla 1.4.</b> Sistema de evaluación del índice de Excavabilidad (Hadjigeorgiou y Scoble, 1988).   | -21-        |
| <b>Tabla 1.5.</b> Clasificación de macizos rocosos según su escarificación (Singh <i>et al.</i> , 1989).  | -23-        |
| <b>Tabla 2.1.</b> Valoración referente al espaciamiento de juntas, recomendada por Bieniawski (1976).   | -41-        |
| <b>Tabla 2.2.</b> Clasificación de la persistencia o continuidad de las trazas de las grietas.  | -41-        |
| <b>Tabla 2.3.</b> Clasificación de los parámetros y sus valores.  | -42-        |
| <b>Tabla 2.4.</b> Ajuste de valores por orientación de las juntas.  | -42-        |

|  |      |
|--|------|
| <b>Tabla 2.5.</b> Tabla de categorías de clasificación geomecánica (Bieniawski, 1979).   | -43- |
| <b>Tabla 2.6.</b> Matriz de evaluación de los criterios de selección.  | -45- |
| <b>Tabla 2.7.</b> Matriz de jerarquía y peso de los criterios.   | -46- |
| <b>Tabla 2.8.</b> Rangos de variaciones de los índices geomecánicos en canteras para áridos de Cuba oriental.  | -50- |
| <b>Tabla 3.1.</b> Caracterización del agrietamiento en El Cacao (Tomado de Alexandre, 2006).   | -62- |
| <b>Tabla 3.2.</b> Estadística descriptiva de propiedades físico-mecánicas del yacimiento El Cacao, tomada de 38 pozos (Vincent <i>et al.</i> , 1983) | -63- |
| <b>Tabla 3.3.</b> Rangos de Rc en calizas y rocas ígneas.  | -63- |
| <b>Tabla 3.4.</b> Yacencia de Estructuras geológicas en el yacimiento Pílon.   | -72- |
| <b>Tabla 3.5.</b> Estadística descriptiva de propiedades físico-mecánicas del yacimiento Pílon.  | -73- |
| <b>Tabla 3.6.</b> Yacencia de Estructuras geológicas en el yacimiento Los Guaos.   | -79- |
| <b>Tabla 3.7.</b> Estadística descriptiva de propiedades físico-mecánicas del yacimiento Los Guaos.  | -82- |

## INTRODUCCIÓN

En Cuba, desde el triunfo de la Revolución en enero de 1959, las transformaciones puestas en práctica requirieron de un impetuoso desarrollo de las construcciones y, por consiguiente, se incrementó la demanda de materiales para la construcción. Entre los más solicitados se encuentran los áridos de trituración, los cuales según Alfaro (2003) se definen como materiales minerales sólidos inertes que con las granulometrías adecuadas se usan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante adición de aglomerantes hidráulicos o ligantes bituminosos.

Así es que la industria de materiales para la construcción es una de las ramas más importantes para el desarrollo socio económico de Cuba, pues es la encargada de la producción de áridos y materiales que deben integrarse y compatibilizarse en dos ámbitos: La participación en los planes y programas de la Revolución y su contribución a los requerimientos de las políticas nacionales y provinciales que estén en correspondencia con el papel de cada territorio y su vinculación con el desarrollo sostenible para la prosperidad y satisfacción de las necesidades de la sociedad.

En consecuencia, los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución en Cuba (Partido Comunista de Cuba, 2011) enfatizan en la necesidad de recuperar e incrementar la producción de materiales para la construcción que aseguren los programas inversionistas priorizados del país. En ellos se ha declarado que se debe definir una política tecnológica que contribuya a reorientar el desarrollo industrial.

Además, en dichos lineamientos se indica: "...que comprenda el control de las tecnologías existentes en el país, a fin de promover su modernización. Asimismo, debe priorizarse que las entidades económicas en todas las formas de gestión contarán con el marco regulatorio que propicie la introducción sistemática y acelerada de los resultados de la ciencia, la innovación y la tecnología en los procesos productivos y de servicios, teniendo en cuenta las normas de responsabilidad social y medioambiental establecidas..." (PCC, 2011:22).

Cuba cuenta con yacimientos de rocas para la producción de áridos de trituración de tres tipos genéticos: ígneas, sedimentarias y metamórficas, con más de 1700 millones de metros cúbicos de recursos calculados (Cardentey, 2010). Por ello, la extracción de estos recursos se ha convertido en una importante actividad minera debido a los volúmenes que se mueven cada año en las canteras en explotación que han sido laboreadas atendiendo a los proyectos aprobados al efecto.

En la actualidad, se realizan inversiones para incrementar el volumen y calidad del material extraído de las canteras (Cardentey, 2010), sin embargo, en la mayoría de los casos, no se alcanzan los resultados esperados. Se considera que ello está relacionado con el uso de formas tradicionales de realizar la explotación, vinculadas con los métodos de arranque de las rocas (Watson, 2008).

La explotación de estos macizos rocosos se basa tradicionalmente en análisis ingeniero-geológicos y geomecánicos a partir de los cuales se diseña el uso del método de arranque perforación y voladura. En la práctica, por lo general, no se realiza un análisis previo sobre la elección del método de arranque de las rocas, a partir de los principales factores que influyen en este proceso y sin considerar un examen del posible uso de otro método de arranque, como es el caso del mecánico.

La utilización del método de perforación y voladura sin un análisis previo del método de arranque más racional o el uso de un método de arranque inadecuado, conlleva a incongruencias entre las características geológicas y geomecánicas de los macizos rocosos y el uso del método de arranque. Por tanto se obtienen resultados no deseados, es decir, bloques sobredimensionados o de pequeños tamaños, lo cual indica que el proceso de arranque no es óptimo.

En los últimos años se han introducido en el país varios equipos que pueden realizar el arranque mecánico, sin embargo, han sido destinados solamente a la sustitución de los explosivos en la fragmentación secundaria de las rocas mientras que en el resto mundo estas maquinarias son empleadas eficientemente para el arranque directo en los frentes de cantera (Watson, 2008).

La disponibilidad de esta tecnología en el país abre la posibilidad de utilizar el método de arranque mecánico durante la explotación de un macizo rocoso. De ahí la necesidad de realizar estudios que permitan argumentar desde una perspectiva científico-técnológica el método de arranque más adecuado en canteras de materiales para la construcción.

A partir del análisis de la literatura especializada no se pudo demostrar la existencia de un procedimiento para elegir o establecer métodos más racionales de arranque de las rocas en Cuba. Sin embargo, a nivel internacional sí se encontraron criterios establecidos para minas a cielo abierto de carbón y la construcción de carreteras, por lo que se declara como **problema científico**:

Inexistencia de un procedimiento integrado y sistémico que garantice la elección adecuada del método de arranque de las rocas en canteras para áridos.

**Objeto de estudio:** El macizo rocoso de las canteras para áridos.

**Campo de acción:** Los procesos de arranque en canteras para áridos.

**Objetivo general:** Elaborar un procedimiento integrado y sistémico para la elección del método de arranque de las rocas en canteras para áridos a partir de criterios geológicos y geomecánicos del macizo rocoso.

**Hipótesis:** Si se caracteriza el macizo rocoso integrando y sistematizando sus características geológicas y propiedades geomecánicas, expresadas a través de índices geológicos y geomecánicos, es posible establecer un procedimiento para la elección del método más racional de arranque de las rocas en canteras para áridos.

**Objetivos específicos:**

1. Identificar los índices geológicos y geomecánicos que posibiliten, mediante el establecimiento de los dominios geomecánicos, la elaboración del procedimiento para la elección de un método racional de arranque de las rocas
2. Diseñar las etapas que integran el procedimiento establecido para la elección del método de arranque de las rocas.

3. Validar el procedimiento propuesto en canteras para áridos con diferentes condiciones geológicas y geomecánicas.

Se definen como **tareas** para el cumplimiento de los objetivos específicos las siguientes:

Para cumplir el objetivo 1:

1. Actualización, mediante búsqueda bibliográfica, del estado del arte relacionado con la selección y aplicación de los métodos de arranque y clasificaciones de excavabilidad de las rocas.
2. Sistematización del conocimiento científico que posibilite la selección e identificación de los índices geológicos y geomecánicos considerados durante la explotación de un macizo rocoso.

Para cumplir el objetivo 2:

1. Identificación de los parámetros que influyen en la excavabilidad del macizo rocoso.
2. Determinación, mediante la metodología de consulta a expertos, de los parámetros más influyentes en la excavabilidad de las rocas en las canteras para áridos.
3. Clasificación de los parámetros geotécnicos del macizo rocoso, en índices geológicos y geomecánicos, basada en la integración de sus características.
4. Establecimiento de los dominios geomecánicos en función de los índices antes mencionados.
5. Decisión de los elementos que integran el procedimiento, así como sus pasos y diagrama de ejecución.

Para cumplir el objetivo 3:

1. Caracterización geológica y geomecánica de canteras para áridos con diferentes condiciones geológicas y geomecánicas.

2. Selección de las canteras a las que se le aplicará el procedimiento elaborado para la elección del método de arranque de las rocas.
3. Aplicación del procedimiento a las canteras seleccionadas.

**Novedad científica:** El procedimiento para la elección del método más racional de arranque de las rocas en las canteras para áridos.

Los principales **métodos de investigación científica** empleados en el trabajo se exponen a continuación:

1. Métodos Empíricos:

- a) Las encuestas para obtener información sobre los parámetros que influyen en la excavabilidad de la roca.

2. Métodos Teóricos:

- a) Deductivo-Inductivo: para la identificación de los principales parámetros que inciden en el proceso de excavabilidad de la roca.
- b) Hipotético-Deductivo: para la formulación de una hipótesis y luego, a partir de inferencias lógicas-deductivas, se arriba a conclusiones particulares que posteriormente se pueden comprobar.
- c) Análisis-Síntesis: para la interpretación de los resultados obtenidos en el análisis estadístico de la información procesada.

El criterio de experto, a través del Método Delphi se emplea para la determinación de los parámetros que influyen en la excavabilidad de la roca en las canteras estudiadas.

**Estructura de la tesis**

Los resultados se presentan en una introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones y anexos. En el primer capítulo se exponen a través de un marco teórico- metodológico los antecedentes y estado actual sobre los métodos de arranque utilizados durante la explotación de macizos rocosos para la producción de



áridos. Este capítulo aborda además las generalidades sobre el macizo rocoso y la clasificación del mismo según su excavabilidad con énfasis en las clasificaciones geomecánicas.

En el capítulo dos se desarrolla el procedimiento para elegir el método de arranque de las rocas más racional en canteras para áridos, según las características geológicas y geomecánicas de los macizos rocosos. Contiene además la concepción del diagrama a través del cual se ejecuta el procedimiento elaborado.

En el tercer capítulo se muestran los resultados mediante la implementación del procedimiento elaborado en tres casos de estudio de canteras para áridos, seleccionadas en función de las diferencias en las características geológicas y geomecánicas de los macizos rocosos correspondientes.

### **Producción científica del autor sobre el tema de la tesis**

Como parte de la investigación, la autora desarrolló un conjunto de trabajos relacionados con: publicaciones en revistas (4), publicaciones en eventos científicos (13), trabajos de diploma (5), y proyectos de investigación (3). Estos trabajos se relacionan a continuación.

#### **Publicaciones en eventos científicos:**

1. Hernández, N.; M. Ulloa. (2010): Explotación subterránea de canteras, una alternativa económica y ambiental en zonas urbanas. CD IV Taller Regional de Medio Ambiente. Holguín /2010 ISBN 978-959-16-1209-0.
2. Hernández, N.; M. Ulloa; Y. Rosario. (2010): Impacto ambiental de la explotación del yacimiento de materiales de construcción El Cacao. V Taller Regional de Medio Ambiente. Holguín/2010. ISBN 959-7117-03-7.
3. Hernández, N.; M. Ulloa.; Y. Rosario. Evaluación socio-ambiental asociada a la explotación del yacimiento de materiales de construcción la Inagua, Guantánamo, Cuba. Memorias en CD-Rom, VI Taller Regional de Medio Ambiente. ISSN 978-959-16-2118-4.
4. Hernández, N.; Y. Rosario; Y. Almaguer; J. Otaño. (2013): Procedimiento para

la elección del método de arranque de la roca en las canteras de áridos. V Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS´2013. Memorias en CD-Rom, La Habana, 1 al 5 de abril de 2013. ISSN 2307-499X.

#### **Publicaciones en revistas científicas:**

1. Hernández, N.; M. Ulloa; Y. Rosario (2011): Impacto ambiental de la explotación del yacimiento de materiales de construcción El Cacao. Revista Minería y Geología / v.27 n.1 / enero-marzo / p. 38-53 ISSN 1993 8012.
2. Hernández-Jatib, N., Ulloa-Carcasés, M., Almaguer-Carmenate, Y. y Ferrer, Y. R. (2014). Evaluación ambiental asociada a la explotación del yacimiento de materiales de construcción La Inagua, Guantánamo, Cuba. *Revista Luna Azul*, Manizales. Colombia. ISSN 1918-2474. Recuperado de:  
<http://lunazul.ucaldas.edu.co/index.php?option=content&task=view&id=899>.
3. Hernández-Jatib, N., Almaguer-Carmenate, Y. y Ferrer, Y. R. (2014). Determinación del método de arranque de la roca. caso de estudio: Cantera Pilón, Mayarí. Revista Minería y Geología / v.31 n.2 / abril-junio / p. 38-53 ISSN 885-1583-1.
4. Hernández-Jatib, N., Almaguer-Carmenate, Y., Ferrer, Y. R. y J. Otaño (2014). Árbol de excavabilidad para elegir método de arranque en canteras de áridos de la construcción: yacimiento El Cacao. Revista Minería y Geología / v.30 n.3/ julio-septiembre / p. 67-84 ISSN 1993 8012.

#### **Trabajos de diploma tutorados:**

1. Alcaide, Y. Caracterización de la industria extractiva de materiales para la construcción en la provincia Santiago de Cuba. ISMMM. Julio/2010.
2. Acuña, R. Criterios para la elección de los métodos de arranque de las rocas en las canteras de áridos. ISMMM. Julio/2012.
3. Rodríguez, A. Actualización del Proyecto de Explotación de la cantera de materiales para la construcción El Cacao. ISMMM. Julio/2013.
4. Vega, L. Elección del método de arranque de las rocas en la cantera para áridos "Los Caliches". ISMMM. Julio/2014.

5. Despayne, Y. Elección del método de arranque de las rocas en la cantera para áridos "Yarayabo". ISMMM. Julio/2014.

**Proyectos de investigación en los que ha participado:**

1. Proyecto CITMA: Criterios para la elección del método de arranque en las canteras de materiales de construcción. Innovación Tecnológica, (CITMA), 2010.
2. Proyecto Institucional: Procedimiento para la elección del método de arranque de las rocas en las canteras de materiales de construcción en la región oriental de Cuba. Grupo Empresarial de la Industria de la Construcción (GEICON), 2013.
3. Proyecto Asociado a Programa Nacional: Manejo ambiental sostenible de la explotación de yacimientos de materiales de construcción. Estrategia nacional de ciencia, tecnología e innovación. Empresas provinciales de materiales de la construcción (MICONS), 2014.

## **CAPÍTULO I. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA**

### **1.1. Introducción**

La excavación de las rocas es un proceso complejo que depende de múltiples parámetros los cuales están estrechamente relacionados con los métodos de arranque. Esta temática no ha sido suficientemente investigada en Cuba para el caso de las canteras para áridos. Es por ello que se requiere del estudio de las clasificaciones de excavabilidad y de los trabajos precedentes que pueden contribuir en el análisis y la solución del problema investigado.

El objetivo del presente capítulo es ofrecer una visión general sobre los métodos de arranque y de las clasificaciones de excavabilidad de las rocas. A partir del conocimiento de los antecedentes ha sido seleccionada y analizada la información más importante, para establecer los índices de dichas clasificaciones a considerar durante la explotación de un macizo rocoso.

### **1.2. Métodos de arranque de las rocas**

La elección del método de arranque depende de las propiedades del macizo rocoso, las exigencias en la calidad de la materia prima y los factores medio ambientales (Solis *et al.*, 2004). Es por eso que, de acuerdo con este autor, para la excavación de las rocas blandas se puede utilizar cualquier equipo de arranque, en este caso, la preparación del macizo se conjuga con la excavación y se realiza con la misma

maquinaria mientras que la excavación de las rocas duras, se realiza con equipamiento de mayor potencia y el macizo se prepara mediante el uso de explosivos.

En condiciones geólogo-mineras determinadas, el arranque mecánico de las rocas presenta ventajas sobre la perforación y voladura. La causa principal es la ausencia de vibraciones en el terreno y el no lanzamiento de fragmentos de rocas durante la explosión. De ahí que sea muy factible para utilizarlo cerca de zonas pobladas. Además, la aplicación del método mecánico, en ocasiones, posibilita la disminución del costo de la fragmentación de las rocas y las pérdidas y el empobrecimiento del material. También posibilita el aumento de la productividad del trabajo y de los equipos de carga y transporte (Solis *et al.*, 2004).

A continuación se relacionan los métodos de arranque de las rocas:

- Manual
- Mecánico
- Perforación y voladura
- Hidromecánico

En el caso específico de Cuba, en particular en las canteras para áridos de trituración, usualmente se utilizan los métodos mecánicos y de perforación y voladura.

El arranque mecánico puede realizarse con diferentes equipos:

- Excavadoras
- Tractores con escarificador
- Martillos rompedores

El arranque con excavadoras (excavación) puede realizarse en los macizos rocosos de constitución simple o compuesta, en sus diferentes escalas en la clasificación genética de las rocas. En este caso, los procesos de arranque y carga se realizan sucesivamente con el mismo equipo.

El arranque, utilizando tractor con escarificador y martillos rompedores neumáticos o hidráulicos, se realiza como proceso de preparación de la masa minera para su

posterior transportación con distintos tipos de equipos de carga. A este método de arranque se le denomina escarificación.

Al método de arranque con perforación y voladura, en lo adelante, se denomina voladura.

En Cuba, en las canteras para áridos con macizos rocosos ligados, normalmente se utiliza la voladura como método de arranque, sin que se disponga de un procedimiento científicamente fundamentado para elegir, en cada caso concreto, el método de arranque idóneo a partir de las propiedades del macizo rocoso.

### **1.3. El macizo rocoso**

Un macizo de rocas está formado por bloques de roca intacta separados por discontinuidades. El comportamiento de este macizo frente a las acciones externas que actúan sobre él, depende tanto de las propiedades de la roca intacta y sus discontinuidades como de la resistencia del macizo.

La roca intacta se caracteriza por:

- Su génesis: ígneas, sedimentarias y metamórficas
- Grado de meteorización (adimensional)
- Su porosidad (%)
- Sus propiedades hidrodinámicas: humedad total (%) y humedad natural (%).
- Sus propiedades físicas y mecánicas: densidad ( $\text{kg/m}^3$ ), masa volumétrica ( $\text{kg/m}^3$ ), peso específico ( $\text{kg/m}^3$ ), peso volumétrico ( $\text{kg/m}^3$ ), módulo de elasticidad ( $\text{N/m}^2$ ), módulo de distorsión ( $\text{N/m}^2$ ), módulo de elasticidad volumétrico ( $\text{N/m}^2$ ), coeficiente de Poisson (adimensional), módulo de plasticidad ( $\text{N/m}^2$ ), coeficiente de plasticidad (adimensional), resistencia a compresión (MPa), resistencia a tracción ( $\text{kN/m}^2$ ), resistencia a cortante (MPa), resistencia a flexión (MPa), ángulo de fricción interna (grados sexagesimales), coeficiente de fricción interna (grados sexagesimales), velocidad de las ondas longitudinales (km/s), velocidad de las ondas transversales (km/s).
- Sus índices minero-tecnológicos: coeficiente de fortaleza (adimensional), dureza (adimensional), abrasividad (adimensional), triturabilidad (adimensional),

perforabilidad (adimensional), explosionabilidad (adimensional), resistencia al corte y al rompimiento (MPa).

Las discontinuidades se caracterizan por:

- Orientación: dirección de buzamiento y buzamiento (grados sexagesimales)
- Espaciado (m)
- Persistencia (m)
- Rugosidad: ondulación y aspereza (m)
- Apertura (m)
- Relleno, que incluye: ancho (m), mineralogía (adimensional), tamaño de partículas (m), grado de meteorización (adimensional), humedad (%), permeabilidad (%), flujo de agua ( $m^3/s$ ), número de familias de grietas (m), tamaño de bloque (m), grado de fracturación del macizo (adimensional) y resistencia al corte del mismo (MPa).

Otras propiedades:

- Resistencia del macizo (MPa).
- Índice del macizo rocoso, RMI (adimensional).

#### **1.4. Clasificación de los macizos rocosos según su excavabilidad**

Los sistemas de clasificación del macizo rocoso tienen en cuenta más o menos peculiaridades, en dependencia del contexto enmarcado (Franklin y Dusseaul, 1989). No obstante, es posible llegar a un consenso al seleccionar los tipos más relevantes de observaciones y simplificar los procedimientos para las pruebas tanto como sea posible.

Numerosos investigadores han abordado el problema de la elección del método de arranque de las rocas, fundamentalmente para el laboreo de las excavaciones subterráneas, incluyendo a Duncan (1969), Franklin (1971, 1997); Louis (1974); Atkinson (1977), Romana (1981, 1997, 1994); Kirsten (1982); Abdullatif y Crudden, (1983); Scoble y Muftuoglu (1984); Bell (1987); Hadjigeorgiou y Scoble (1988), entre otros

Duncan (1969) establece que las evaluaciones para determinar la facilidad o dificultad con la cual el macizo rocoso puede ser excavado, se basan en el tipo de roca (ígneas, sedimentaria o metamórfica), sus características (composición, espesores, yacencia, etc.), estado de conservación y la naturaleza, extensión y orientación de las fracturas.

Louis (1974) presenta un gráfico de excavabilidad basado en el índice de calidad de la roca ( $RQD$  %) propuesto por Deere (1966) y en los valores de la resistencia a compresión simple de la roca (Figura 1.1), sin embargo no considera la influencia de la yacencia del agrietamiento y el arranque de la roca. Los criterios propuestos por estos investigadores no son muy aplicados en la actualidad, fundamentalmente para los métodos mecánicos, porque los rangos de resistencia son muy limitados o específicos.

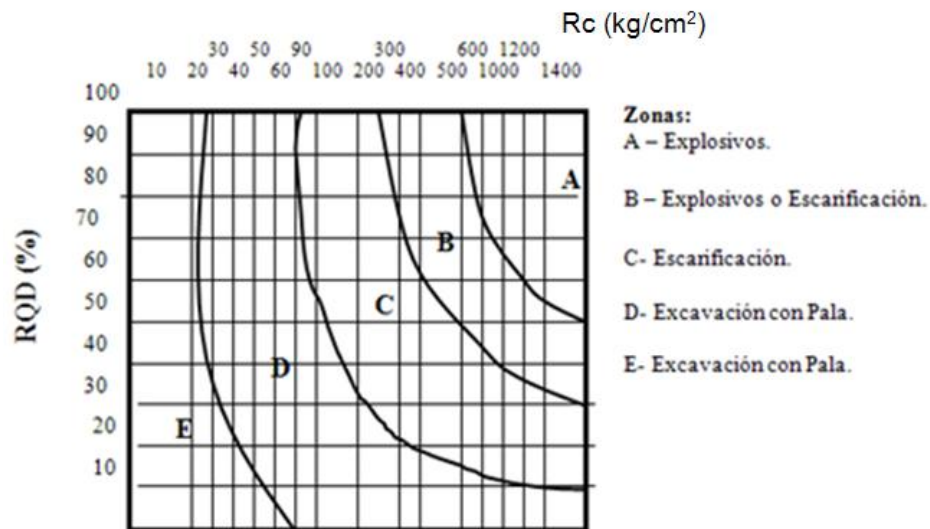


Figura 1.1 Clasificación propuesta por Louis (1974).

Romana (1981) propone una clasificación de los macizos basada en la propuesta de Louis (1974) pero adaptada a las capacidades tecnológicas de las maquinarias de excavación (Figura 1.2 y Tabla 1.1).



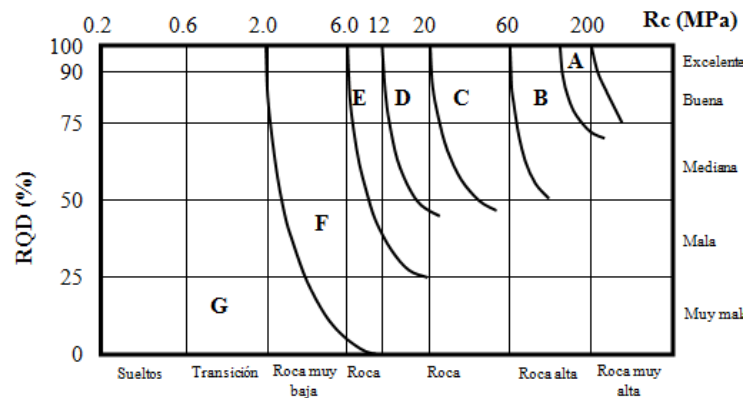


Figura 1.2 Clasificación propuesta por Romana (1981).

Tabla 1.1 Clasificación de los macizos rocosos respecto a la excavabilidad (Romana, 1981)

| Zona     | Topo       |            | Rozadora  |          |          | Martillo  | Pala      |
|----------|------------|------------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|
|          | Fn > 25 tn | Fn < 25 tn | P > 80 tn | 50-80 tn | < 50 tn  |           |           |
| <b>A</b> | Posible ?  | -          | -         | -        | -        | -         | -         |
| <b>B</b> | Adecuado   | Posible ?  | Posible ? | -        | -        | -         | -         |
| <b>C</b> | Adecuado   | Adecuado   | Adecuado  | Adecuado | -        | -         | -         |
| <b>D</b> | Adecuado   | Adecuado   | Adecuado  | Adecuado | Posible  | Posible ? | -         |
| <b>E</b> | Posible    | Posible    | Adecuado  | Adecuado | Adecuado | Posible   | Posible ? |
| <b>F</b> | -          | -          | -         | Adecuado | Adecuado | Adecuado  | Posible   |
| <b>G</b> | -          | -          | -         | -        | Posible  | Posible ? | Adecuado  |

Posteriormente Romana (1981) presenta una versión más actualizada de dicha clasificación en función de la calidad del macizo y la resistencia a la compresión de la roca, al indicar los intervalos de aplicación de los diferentes métodos de excavación. Esta clasificación se limita a la construcción de túneles, pero se considera que presenta inconvenientes que impiden, en determinado grado, su empleo para determinar por sí sola el método de arranque de la roca.

Kirsten (1982) propuso un sistema de clasificación para la evaluación de la excavabilidad, en términos de las características del macizo rocoso, tales como la tensión del macizo, tamaño del bloque, orientación relativa de la estructura geológica y tensión de la pared de la junta. El sistema se basa en las propiedades ingenieriles, desde suelos débiles hasta la roca más dura y formula el índice de excavabilidad ( $n$ ),

determinado mediante el uso graduado de varios sistemas de clasificaciones para la evaluación de la escarificación de la roca.

El sistema propuesto presenta algunas limitaciones relacionadas con el comportamiento estructural del macizo, lo cual no le permite determinar el método más adecuado de arranque. No se valora el grado de humedad de las rocas, un parámetro que afecta considerablemente las características de resistencia del macizo. Además no se tiene presente la estratificación del macizo, la separación en bloques ni el grado de deterioro de las rocas, siendo estos los elementos que mayor influencia tienen en el comportamiento estructural del macizo rocoso y, por consiguiente, en el proceso de arranque.

Abdullatif y Crudden (1983) analizan casos de estudio donde el arranque de la roca se realiza con medios mecánicos y voladura, utilizando los valores del índice de clasificación de la masa rocosa (*RMR*, por sus siglas en inglés) propuesto por Bieniawski (1976), junto a los valores del índice de calidad (*Q*) planteado por Barton (1974), quienes estimaron que la excavación es posible hasta un *RMR* de 30 y escarificable hasta un valor de 60; además determinan que en los macizos clasificados como de calidad buena por el sistema *RMR* debe ser aplicado el método de perforación y voladura (Figura 1.3).

Esta clasificación de excavabilidad, aunque permite obtener un criterio sobre el método de arranque de la roca, posee algunas limitaciones que impiden un uso más amplio en cuanto al campo de utilización. Los autores hacen una evaluación sobre valores estimados del *RMR* para proponer el método de laboreo, sin embargo, no existe una correcta adecuación del sistema de clasificación *Q* a las operaciones de arranque, ni tampoco una correlación entre el *RMR* y los valores de *Q*; a esto se le añade el hecho de que no se tiene en cuenta el valor de la resistencia del macizo sino el valor de la resistencia lineal de las rocas, lo que constituye una limitante para la aplicación de la misma.

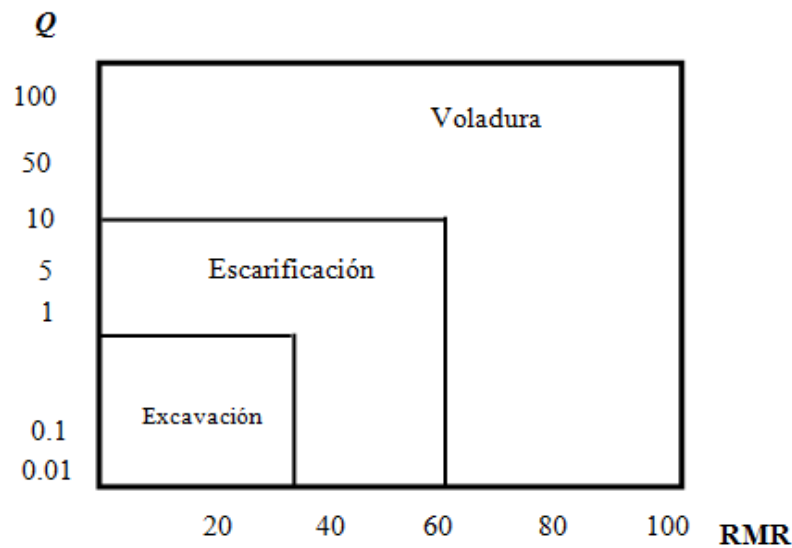


Figura 1.3 Clasificación propuesta por Abdullatif y Crudden (1983).

Minty y Kerans (1983) modifican el sistema de Weaver (1975) para las condiciones australianas. El índice de factores geológicos (*GFR*) incorpora nuevos valores numéricos e incluyen factores para las condiciones de las aguas subterráneas, así como para la rugosidad superficial de las discontinuidades que fueron incluidos en el sistema original *RMR*. En este sistema se multiplica el índice *GFR* por la velocidad de las ondas sísmicas y se grafica el producto contra la potencia del tractor, con el objetivo de determinar si el escarificado sería satisfactorio o marginal. La velocidad de las ondas sísmicas está muy relacionada con los demás parámetros incluidos en este sistema.

Romana (1994) propone un sistema de clasificación para la excavación de los macizos rocosos basado en el siguiente índice:

$$N = R_c \frac{RQD}{J_n} \cdot J_s \cdot \frac{J_r}{J_a} \quad (1.1)$$

Donde:

$N$ , índice de excavación (adimensional);  $R_c$ , resistencia a compresión de las rocas (MPa);  $RQD$ , índice de calidad de la roca (%);  $J_n$  y  $J_r$ , parámetros del sistema de clasificación Q de Barton (adimensionales);  $J_s$ , valor de la disposición relativa de los

bloques inclinados según la dirección de arranque (adimensional). Para material intacto  $J_s = 1,0$ ;  $J_a$ , factor de alteración de la junta (adimensional).

Según el índice de excavación (N), se evalúa la facilidad al arranque mediante escarificado de la siguiente forma:

|   |                      |
|---|----------------------|
| Fácilmente escarificado                   | (1 < N < 10)         |
| Escarificado duro                         | (10 < N < 1 000)     |
| Escarificado muy duro                     | (100 < N < 1 000)    |
| Escarificado extremadamente duro/voladura | (1 000 < N < 10 000) |
| Voladura                                  | (N > 10 000)         |

Ovejero (1987) considera que la velocidad de propagación de las ondas sísmicas de las rocas en el proceso de arranque es el parámetro más significativo y que a partir del mismo se infiere su fortaleza. Esta norma se ha utilizado para clasificar las rocas en cuanto a su escarificación o volabilidad. Aunque, si bien es un parámetro muy significativo, no debe ser tenido en cuenta de manera aislada como decisor único, sino visto en conjunto con otros factores del macizo rocoso como el comportamiento mecánico de la roca y su estructura.

Las clasificaciones de excavabilidad también se han establecido para la minería a cielo abierto. Franklin (1971, 1977) se basa en los valores del espaciamiento entre las grietas ( $E_g$ ) y los valores de la resistencia a la compresión simple de las rocas ( $R_c$ ) (Figura 1.4). En este caso, el índice de espaciamiento entre grietas es un valor promedio, por lo que su medida es aproximada y requiere del acompañamiento de un histograma o su presentación a través de intervalos de variación.

En esta metodología se proponen cuatro zonas o regiones, de acuerdo con los valores de los parámetros medidos, pero no se especifican los tipos de maquinarias de arranque a utilizar ni sus capacidades (Aduvire, 1992).

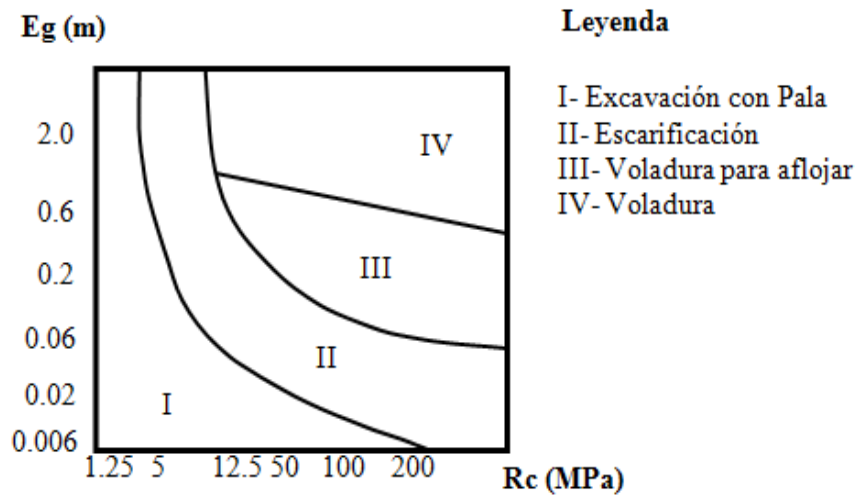


Figura 1.4. Clasificación propuesta por Franklin (1977).

Atkinson (1977) propone un nomograma donde aparecen zonas de aplicación para cada tipo de maquinaria utilizada en el arranque de la roca en función de la resistencia a compresión simple. En la referida investigación, de acuerdo con los criterios expuestos por Noa (2003), no se consideran las discontinuidades de los macizos rocosos, un aspecto de gran influencia en el proceso de excavación porque en las rocas duras el arranque se realiza aprovechando los planos de las estructuras geológicas primarias como los estratos y secundarias como grietas y fallas.

Scoble y Muftuoglu (1984) formulan un índice de excavabilidad del macizo rocoso con siete niveles de excavación (Tabla 1.2) mediante el empleo de la siguiente expresión:

$$IE = W + S + J + B \quad (1.2)$$

Donde:

$IE$ , índice de excavabilidad (adimensional);  $W$ , grado de alteración del macizo rocoso, determinado en las paredes de las excavaciones subterráneas (adimensional);  $S$ , resistencia a la compresión simple (MPa);  $J$ , distancia entre grietas (m);  $B$ , Potencia de los estratos (m).

En el índice *IE* los límites relativos superiores de *S*, *J* y *B* se definen al tomar como referencia el rendimiento de las excavadoras hidráulicas. A partir de esto se determina que todos los macizos rocosos con índices menores a 70 pueden arrancarse con equipos medianos, entre 70 y 100 con equipos grandes y los de índices mayores a 100 solo con voladuras.

Tabla 1.2 Valoración de la excavabilidad de los macizos rocosos, en función de los valores del índice de excavabilidad propuesto por Scoble y Muftuoglu (1984)

| Clase | Facilidad de excavación | Índice (W+ S+J+B) | Equipo de excavación                                     | Modelos de equipos empleados  |
|-------|-------------------------|-------------------|--|---|
| 1     | Muy fácil               | <40               | Tractores de escarificado;<br>Dragalinas;<br>Excavadoras | Tractor (Cat. D8)<br>Dragalina > 5m <sup>3</sup> (Lima 2400)<br>Excavadora de cables > 3m <sup>3</sup><br>(Ruston Bucyrus 150 RB)       |
| 2     | Fácil                   | 40-50             |  | Tractor (Cat. D9)<br>Dragalina > 8 m <sup>3</sup> ; (Marion 195)<br>Excavadora de Cables > 5m <sup>3</sup> ;<br>(Ruston Bucyrus 150 RB) |
| 3     | Moderadamente difícil   | 50 - 60           | Dragalinas;<br>Excavadoras                               | Tractor - Excavadora – Pala;<br>Cargadora (Cat. D9)<br>Excavadora Hidráulica > 3 m <sup>3</sup> ;<br>(Cat. 245)                         |
| 4     | Difícil                 | 60 - 70           |  | Tractor - Excavadora – Pala<br>Cargadora (Cat. D10).<br>Excavadora Hidráulica > 3 m <sup>3</sup> ;<br>(Cat. 245 ó O&K RH40)             |
| 5     | Muy difícil             | 70 - 95           | Excavadoras  | Excavadora Hidráulica > 3 m <sup>3</sup> ;<br>Cat. 245 ó O&K RH40   |
| 6     | Extremadamente difícil  | 95 -100           |  | Demag H111- Excavadoras;<br>Poclain 1000 CK<br>Hidráulicas P & H 1200 > 7<br>m <sup>3</sup> ; R H 75                                    |
| 7     | Extremadamente difícil  | > 100             |  | Demag H 185 Excavadoras<br>Demag H 241 Hidráulicas O<br>& K RH300 > 10 m <sup>3</sup>   |

Al igual que otras clasificaciones, la de Scoble y Muftuoglu (1984) también presenta algunas limitaciones, el índice sólo permite determinar el tipo de arranque mecánico y está definido para macizos estratificados sin poder generalizarse a otros tipos como masivos o en bloques compuestos por rocas ígneas o metamórficas.

Lilly (1986, 1992) propone el índice de Volabilidad “BI” para trabajos con rocas blandas y duras, obtenido como la semisuma de las calificaciones asignadas a cinco propiedades como se muestra en la siguiente ecuación y en la tabla 1.3:

$$BI = 0,5 \cdot (RMD + JPS + JPO + SGI + RSI) \quad (1.3)$$

*BI*, índice de volabilidad (adimensional); *RMD*, descripción del macizo rocoso (adimensional); *JPS*, espaciamiento de las juntas planares (m); *JPO*, orientación de las juntas planares (grados sexagesimales); *SGI*, peso específico (N/m<sup>3</sup>); *RSI*, dureza de la roca (MPa).

El radio de influencia de la dureza de la roca (*RSI*) se estima a partir de la expresión:  $RSI = 0,05 \times RC$ ; donde *RC* es resistencia a la compresión (MPa).

A partir del índice de volabilidad se puede determinar el consumo específico del explosivo (*CE*) y los factores de energía (*FE*) que se calculan con las expresiones siguientes:

$$CE(kg\ anfo / t) = 0,004 \cdot BI \quad (1.4)$$

$$FE(MJ / t) = 0,015 \cdot BI \quad (1.5)$$

Tabla 1.3 Factores de ponderación de los parámetros del índice de volabilidad, (Lilly, 1986, 1992)

| PARÁMETROS GEOMECÁNICOS   | CALIFICACIÓN             |
|--|--------------------------|
| 1.- Descripción del macizo rocoso (RMD)  |                          |
| Friable/poco consolidado.  | 10                       |
| Diaclasado en bloques.   | 20                       |
| Poco masivo.   | 50                       |
| 2.- Espaciamiento entre planos de juntas (JPS)   |                          |
| Pequeño (< 0,1 m)  | 10                       |
| Medio (0,1 a 1 m)  | 20                       |
| Grande (> 1 m)   | 50                       |
| 3.- Orientación de los planos de juntas (JPO)  |                          |
| Horizontal.  | 10                       |
| Buzamiento normal al frente.   | 20                       |
| Dirección normal al frente.  | 30                       |
| Buzamiento coincidente con el frente   | 40                       |
| 4.- Influencia del peso específico (SGI)<br>(SGI es el peso específico en t/m <sup>3</sup> ) | $SGI = 25 \cdot SG - 50$ |

Singh *et al.* (1987) formulan un índice de escarificación para formaciones carboníferas. Ellos proponen gráficos para el funcionamiento del escarificador en una amplia variedad de rocas que se basan en la velocidad sísmica de propagación de las ondas de compresión (ondas P) a través del macizo rocoso mediante una prospección geofísica de sísmica de refracción (Church, 1981; Caterpillar, 2001). El índice propuesto presenta limitaciones por incluir un solo parámetro sin tener en cuenta la intensidad de agrietamiento y espaciado entre discontinuidades.

Hadjigeorgiou y Scoble (1988) presentan un sistema de clasificación empírica para evaluar la facilidad de excavación de los macizos rocosos al combinar los valores de cuatro parámetros geomecánicos: resistencia bajo carga puntual ( $I_s$ ), tamaño de bloque ( $B_s$ ), alteración y disposición estructural relativa. En la Tabla 1.4 se presentan los valores asignados a cada uno de los parámetros.

Tabla 1.4 Sistema de evaluación del índice de Excavabilidad (Hadjigeorgiou y Scoble, 1988)

| Clase   | 1             | 2           | 3                     | 4            | 5                |
|---|---------------|-------------|-----------------------|--------------|------------------|
| <b>Resistencia bajo carga puntual: <math>I_s(50)</math></b> | 0,5           | 0,5 – 2,0   | 1,5-2,0               | 2,0-3,5      | >3,5             |
| <b>Valoración (<math>I_s</math>)</b>                        | 0             | 10          | 15                    | 20           | 25               |
| <b>Tamaño de bloque</b>                                     | Muy pequeño   | Muy pequeño | Medio                 | Grande       | Muy grande       |
| <b><math>J_v</math> (Juntas/m<sup>3</sup>)</b>              | 30            | 10-30       | 3-10                  | 1-3          | 1                |
| <b>Valoración (<math>B_s</math>)</b>                        | 5             | 15          | 30                    | 45           | 50               |
| <b>Alteración</b>   |               |             |                       |              |                  |
| <b>Valoración (<math>W</math>)</b>                          | 0,6           | 0,7         | 0,8                   | 0,9          | 1,0              |
| <b>Disposición estructural relativa</b>                     | Muy favorable | Favorable   | Ligeramente favorable | Desfavorable | Muy desfavorable |
| <b>Valoración (<math>J_s</math>)</b>                        | 0,5           | 0,7         | 1,0                   | 1,3          | 1,5              |
| <b>Valoración IE</b>  | Muy fácil     | Fácil       | Difícil               | Muy difícil  | Voladura         |
| <b>Facilidad de excavación</b>                              | < 200,5       | 20-30       | 30-45                 | 45-55        | >55              |

El Índice de Excavabilidad (IE) se define mediante la expresión:

$$IE = (I_s + B_s) \cdot W \cdot J_s \quad (1.6)$$



$I_s$ , índice de resistencia bajo carga puntual (MPa);  $B_s$ , índice de tamaño de bloque;  $W$ , índice de alteración;  $J_s$ , índice de disposición estructural relativa.

Los índices  $I_s$  y  $B_s$  constituyen los de mayor importancia del índice  $IE$  porque condicionan la resistencia y tamaño de bloque del macizo y por consecuencia la facilidad de excavación.

Del método anterior se deduce que, en algunos casos, la mayor alteración o meteorización de los materiales rocosos puede propiciar una excavación más fácil. De igual manera, la disposición espacial de la estructura rocosa con respecto a las direcciones y sentidos de los elementos de arranque juega un papel significativo, llegando a afectar la excavabilidad de los macizos y por este motivo también interviene en el sistema de evaluación. Esta metodología es aplicable, tanto para los trabajos subterráneos como a cielo abierto, sin embargo, no toma en cuenta la distribución espacial de las características geológicas y geomecánicas.

Singh *et al*, (1989), definen un índice de arranque de las rocas ( $IR$ ) que consiste en la determinación de cuatro parámetros geomecánicos para la clasificación de los macizos rocosos (Tabla 1.5). Los parámetros del procedimiento son: la resistencia a la tracción y espaciamiento entre discontinuidades, ambos estimados a partir del índice de carga puntual o con ensayo brasiliano; el grado de meteorización, el cual se obtiene mediante observación visual y el grado de abrasividad obtenido por medio del índice de Cercha. A partir del  $IR$  se clasifican los macizos rocosos en cinco grupos de acuerdo con la facilidad de arranque mecánico de las rocas.

El método expuesto ofrece información orientativa, de carácter generalizador, que requiere su precisión en cada frente o sector del yacimiento, por lo que se necesita la presencia de personal calificado en cada caso. Para las condiciones estudiadas es necesario regionalizar o sectorizar las características que definen en este sentido el método de arranque y las cualidades del macizo.

Tabla 1.5 Clasificación de macizos rocosos según su escarificación (Singh *et al.*, 1989)

| Parámetros                                      | Clases de macizos rocosos |               |                |                    |            |
|---|---------------------------|---------------|----------------|--------------------|------------|
|   | 1                         | 2             | 3              | 4                  | 5          |
| <b>Resistencia a tracción (Mpa)</b>             | < 2                       | 2 - 6         | 6-10           | 10-15              | > 15       |
| <b>Valoración</b>                               | 0-4                       | 4 - 8         | 8-12           | 12-16              | 16-20      |
| <b>Grado de alteración</b>                      | Completo                  | Alto          | Moderado       | Ligero             | Nulo       |
| <b>Valoración</b>                               | 0-4                       | 4 - 8         | 8-12           | 12-16              | 16-20      |
| <b>Grado de abrasividad</b>                     | Muy bajo                  | Bajo          | Moderado       | Alto               | Nulo       |
| <b>Valoración</b>                               | 0-4                       |               | 8-12           | 12-16              | 16-20      |
| <b>Espaciamiento entre discontinuidades (m)</b> | < 0,06                    | 4- 8          | 0,3-1          | 1-2                | > 2        |
| <b>Valoración</b>                               | 0-10                      | 06 - 0,3      | 20-30          | 30-40              | 40-50      |
| <b>Valoración total</b>                         | < 22                      | 10 - 20       | 44-66          | 66-88              | > 88       |
| <b>Escarificación</b>                           | Fácil                     | 22 - 44       | Difícil        | Marginal           | Voladuras  |
| <b>Tractor recomendado</b>                      | Ninguno-clase 1 ligero    | Clase 2 medio | Clase 3 pesado | Clase 4 muy pesado | Clase 5 -- |
| <b>Potencia (kW)</b>                            | < 150                     | 150-250       | 250-350        | < 350              | --         |
| <b>Peso (t)</b>                                 | < 25                      | 25-35         | 35-55          | < 55               | --         |

El método gráfico propuesto por Karpuz (1990) para seleccionar el arranque de las rocas se basa en los valores de los índices de carga puntual y espaciamiento de las discontinuidades. Este último parámetro define el tamaño de los bloques del macizo mientras que los valores de carga puntual se vinculan con la fortaleza de la roca. Dicho autor considera principalmente dos métodos de arranque de las rocas: perforación y voladura y el mecánico. Este último consta de cuatro variantes: escarificación extremadamente difícil, muy difícil, difícil y fácil (Figura 1.5).

Este gráfico, muy utilizado en la actualidad, sirve de guía al basarse también en los métodos citados por Franklin (1971), Kirsten (1982), Scoble y Muftuoglu (1984) y Smith (1986) pero se recomienda la ampliación de los rangos para las propiedades descritas.

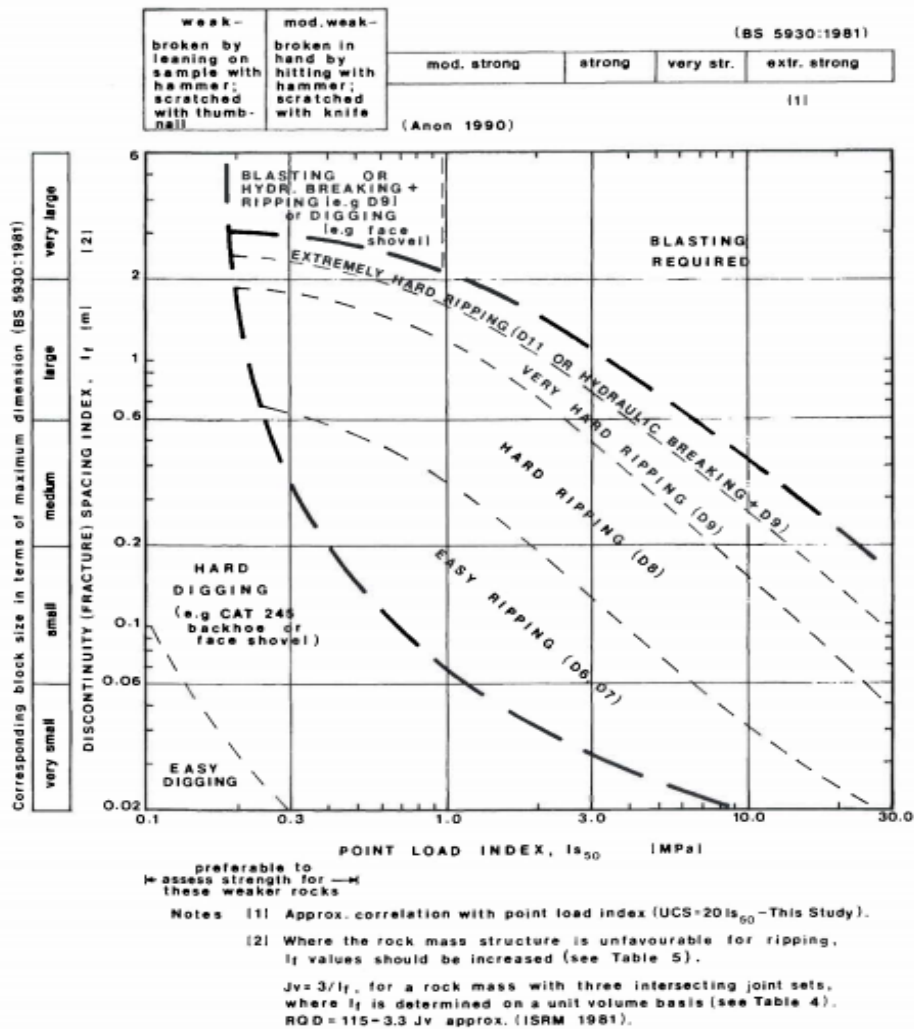


Figura 1.5 Método gráfico de excavabilidad de la roca (tomado de Karpuz, 1990).

Pettifer y Fookes (1994) establecen que la excavabilidad de la roca depende de propiedades individuales del macizo rocoso, del equipamiento para la excavación y del método de laboreo. Establecen que además de la tensión de la roca, expresada por el índice de carga puntual y las características de las discontinuidades, se define el tamaño individual del bloque rocoso, como uno de los parámetros más importantes para la escarificación de la roca.

Dichos autores muestran un gráfico detallado, similar al propuesto por Franklin *et al.* (1971) que incluye una categorización más detallada de los métodos de excavación. Dicha investigación reviste importancia porque constituye la principal referencia para

el establecimiento de los rangos de los índices utilizados en la presente investigación para la delimitación de los métodos de arranque en canteras de áridos.

Jamaluddin y Mogana (2000), Mohd, Amin y Tonnizam (2003), Jamaluddin y Yusuf (2003) y Caterpillar (2001, 2006) entre otros, utilizan la evaluación de los métodos de excavación sobre la base del método gráfico de Karpuz (1990), con los que se obtiene resultados satisfactorios en macizos rocosos de geología variada.

Hakan (2004) realiza un estudio de excavabilidad utilizando cuatro parámetros: resistencia a la compresión uniaxial (*UCS*), índice de carga puntual, velocidad sísmica, espaciado de las discontinuidades. También propone el uso de la energía específica, (definida como la energía para extraer unidad de volumen de material) para las evaluaciones. Estos parámetros se dividen en cinco clases principales con respecto a la clasificación de escarificación.

Aunque muchos métodos de evaluación de la excavabilidad se basan en la velocidad de las ondas sísmicas como indicador, sus resultados a menudo son poco fiables (Kramadibrata, 1998; Rucker, 1999; Hakan, 2004). Esto se debe fundamentalmente a las propiedades básicas de las rocas, tales como resistencia y abrasividad que afectan directamente en el método de escarificación.

Scoble y Muftuoglu (1984) y Basarir (2006) concluyeron que las características de las rocas junto a las dimensiones de la excavación son factores que afectan la escarificación. Del análisis sobre la revisión del referido trabajo se distingue que los autores han basado su estudio sólo en dos factores al no evaluar otros índices que aseveren su conclusión, lo cual justifica la necesidad de precisar en algunos elementos tales como la estructura del macizo y la evaluación de índices geomecánicos que permitan valorar de forma más efectiva los factores que pudieran afectar al mencionado método mecánico.

Por su parte, Bozdog (1988) modificó el gráfico propuesto por Franklin *et al.* (1971) para sugerir el tipo de equipamiento en sus casos de estudio. Este plantea que dentro de las propiedades del macizo rocoso para tener en cuenta, se incluye el tipo de roca, grado de alteración, características estructurales, abrasividad, contenido de

humedad y la velocidad de las ondas sísmicas. Como deficiencia de la investigación se considera la no utilización de parámetros como el espaciamiento entre discontinuidades y valores de resistencia a la carga puntual o a la compresión simple para estimar el método de excavación.

Hoek y Karzulovic (2000) utilizaron los datos del estudio de Abdullatif y Cruden (1983) para estimar el índice de resistencia geológica (*GSI*) con la finalidad de evaluar la resistencia del macizo rocoso, propuesto por Hoek y Brown (1997). Para valorar este índice y la tensión de los macizos rocosos, Hoek y Karzulovic (2000) y, Tsiambaous y Saroglou (2005) sugieren un rango de *GSI* para diferentes métodos de excavación y proponen que los macizos rocosos pueden ser excavados con valores *GSI* hasta 40 y valores de tensiones del macizo de alrededor de 1 MPa, mientras que pueden ser escarificados para valores de *GSI* de alrededor de 60 y valores de tensión del macizo alrededor de 10 MPa. La voladura sería el único método efectivo de excavación para los macizos rocosos que exhiben valores de *GSI* mayores que 60 y tensiones mayores a 15 MPa.

### **1.5. Actualidad y situación del tema en Cuba**

El establecimiento de indicaciones metodológicas para la elección del método de arranque de rocas sólo ha sido evaluado en Cuba por Noa (2003), aunque su propuesta es empleada durante el laboreo de excavaciones subterráneas horizontales de pequeña y mediana sección en la región oriental del país.

El autor supera algunas de las limitaciones presentes en trabajos precedentes, mediante la creación de una metodología que permite agrupar diferentes parámetros hasta entonces utilizados indistintamente y de forma aislada por varios autores. Esta investigación fue satisfactoria para los objetivos propuestos. Sin embargo, su metodología no tuvo en cuenta la delimitación de dominios geomecánicos que permitieran la agrupación del macizo por sectores con semejanzas en el comportamiento de las variables analizadas.

A pesar de los criterios anteriores, no se reporta en la literatura consultada el uso de un procedimiento que integre las principales características geológicas y geomecánicas del macizo.

Todos los aspectos abordados en el análisis bibliográfico, resaltan la necesidad de estudios con enfoques sistémicos que favorezcan la aplicación de los métodos de arranque de las rocas en función de las condiciones objetivas de cada macizo rocoso.

### **1.6. Conclusiones**

La elección del método de arranque ha sido estudiada por diversos investigadores que han propuesto clasificaciones de excavabilidad de las rocas, dirigidas en lo fundamental a las excavaciones subterráneas y, en menor medida, a las labores a cielo abierto.

Las clasificaciones propuestas por los diferentes autores emplean, entre otros, los parámetros geotécnicos siguientes: velocidad de las ondas sísmicas; resistencia a la carga puntual; resistencia a la compresión simple; dureza y abrasividad; así como la orientación, persistencia, distancia entre grietas y tamaño del bloque, lo que constituyen características de las discontinuidades. Estas clasificaciones no integran los índices geológicos y geomecánicos más influyentes en el proceso de arranque, por tanto se consideran poco adecuadas para la elección del método racional de arranque de las rocas.

Los aspectos teórico-experimentales y tecnológicos del proceso de arranque de las rocas en las canteras para áridos en Cuba, sugieren fundamentalmente el empleo de la perforación y voladura como método de arranque. Para ello consideran las características geológicas y geomecánicas del macizo, preestablecidas para justificar la implementación del referido método. Lo anterior, demuestra la necesidad de desarrollar un procedimiento, a partir de un enfoque sistémico, para la elección del método de arranque basado en las características específicas de cada macizo, donde se integren los índices geológicos y geomecánicos del mismo.

## **CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO PARA LA ELECCIÓN DEL MÉTODO DE ARRANQUE DE LAS ROCAS**

### **2.1. Introducción**

La excavabilidad de las rocas depende de diversos parámetros fundamentales que deben ser considerados en el proceso de arranque. La identificación de los principales parámetros que influyen en la excavabilidad del macizo rocoso mediante índices geológicos y geomecánicos resulta novedoso debido a que con la ayuda de tales índices se establecen los dominios geomecánicos que a su vez constituyen la base para establecer un procedimiento, que permita elegir satisfactoriamente el método de arranque más idóneo.

El objetivo del presente capítulo es elaborar un procedimiento para la elección del método de arranque de las rocas en canteras para áridos.

### **2.2. Identificación de los parámetros que influyen en la excavabilidad de las rocas**

Del análisis realizado en las diferentes fuentes bibliográficas estudiadas en el capítulo anterior, se estableció que la metodología a emplear en el proceso de identificación y selección de los parámetros que influyen en la excavabilidad de las rocas debe ser la consulta a expertos, mediante el Método Delphi, por la fiabilidad que el mismo ofrece para la presente temática de investigación.

Dicho método permite definir cuáles elementos serán tomados en consideración para la elaboración del procedimiento a partir de la identificación de los parámetros o criterios, como una de las exigencias principales para la excavabilidad de las rocas.

En la presente investigación se valoraron los parámetros a tener en cuenta para la elaboración del procedimiento, que posibilite la elección del método de arranque de las rocas en canteras para áridos y se confeccionó un listado con los criterios más utilizados en las clasificaciones analizadas en la bibliografía. Dicho registro fue sometido a una consulta a expertos nacionales e internacionales, los cuales valoraron la propuesta y sugirieron la inclusión de nuevos parámetros.

Se sometieron a criterio de expertos un grupo de 15 parámetros que influyen en la elección del método de arranque de las rocas, los cuales muestran a continuación:

- Tipo de roca
- Resistencia a la compresión simple de la roca
- Resistencia a la carga puntual de la roca
- Fortaleza de la roca
- Persistencia o continuidad
- Espaciamiento de las discontinuidades
- Orientación de las discontinuidades
- Tipo de relleno de las grietas
- Tamaño del bloque
- Abrasividad
- Erosión
- Cohesión
- Ángulo de fricción residual
- Velocidad sísmica
- Índice de calidad del macizo (*RMR*).

Existen diferentes métodos para el procesamiento de los criterios, de ellos se seleccionó el Método Delphi (Legrá, 2012), al considerar que el mismo permite una determinación del número de expertos mediante técnicas estadísticas, el nivel de



precisión y confianza deseada, además de aceptarlos y elegirlos en función de su nivel y competencia.

Los especialistas consultados proceden de los centros vinculados con la investigación, la docencia, la producción y los servicios. Se consultaron expertos procedentes de las instituciones siguientes: Empresa de Servicios Minero Geológico (EXPLOMAT) de Ciudad de la Habana (dos especialistas) y Santiago de Cuba (dos especialistas); Empresa de Materiales de la Construcción de Holguín (un especialista); el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (un especialista).

Proceden además de la Oficina Nacional de Recursos Minerales (ONRM) (un especialista); Servicio Geológico Mexicano (SGM) (un especialista); Universidad de Huelva (un especialista); Universidad de Barcelona y Universidad de Oviedo, en España (dos especialistas); Escuela Superior del Litoral, Ecuador (ESPOL) (dos especialistas) y la Universidad de Panamá (dos especialistas) para un total de 15 especialistas.

### **2. 3. Método Delphi**

Para la aplicación del método se siguieron los pasos que se exponen a continuación:

1. Elaboración del cuestionario
  - Se elaboró partiendo de los parámetros que se consideran en las metodologías existentes, para evaluar la facilidad de excavación de la roca en el macizo (epígrafe 2.1).
2. Determinación del número de expertos
  - Para la determinación del número de expertos se utilizó el método probabilístico presentado por Legrá (2012). Como resultado se obtuvo que se deben consultar 10 expertos (Anexo 1).
3. Selección de los expertos
  - Se eligieron 15 candidatos, los cuales fueron encuestados para evaluar su competencia y fueron seleccionados 10 especialistas. El cuestionario

presentado y los resultados de la evaluación de la competencia se recogen en los Anexos 3 y 4.

#### 4. Rondas de Delphi

Las encuestas confeccionadas se enviaron a los expertos para obtener criterios cualitativos en una primera ronda y cuantitativos en las rondas dos y tres, lo que permitió obtener una unidad de criterios acerca de los aspectos que tienen mayor incidencia en los procesos analizados.

##### Primera ronda para determinar los criterios:

En esta ronda se somete al criterio de los expertos el cuestionario elaborado (Anexo 2) para seleccionar los parámetros más importantes para evaluar la excavabilidad (ver epígrafe 2.2) y además obtener de los expertos otros criterios que deben ser considerados. Como resultado de esta ronda, fueron añadidos por sugerencia de los expertos los siguientes criterios: litología, estratificación, porosidad y fallas. Por consiguiente son aceptados 18 parámetros que serán examinados en la siguiente ronda.

##### Segunda ronda para eliminar los criterios de más baja aceptación:

En esta ronda fueron eliminados los parámetros que recibieron un apoyo muy bajo y sometido al proceso de selección 18 parámetros. Cada experto concedió un valor en una escala de 1 a 18 para cada criterio. El mayor valor (18) indica la máxima aceptación del criterio como parámetro para evaluar la excavabilidad de la roca. Fueron seleccionados 11 parámetros como resultado, los cuales pasaron a la tercera ronda (Anexos 5 y 6).

##### Tercera ronda para seleccionar los parámetros a tener en cuenta:

En la tercera ronda fueron seleccionados los parámetros que se deben tener presentes para evaluar la excavabilidad y se determina la concordancia en el criterio de los expertos. Se sometieron al criterio de expertos 11 parámetros (Anexo 7).

Finalmente, se realiza una prueba de significación para determinar la concordancia entre los criterios expresados por los expertos (Legrá, 2006). Al respecto, se definen las siguientes hipótesis con un nivel de significación de 0,05:

Hipótesis nula: ( $H_0$ ): No existe consenso entre los expertos con relación a los criterios emitidos ( $K=0$ ).

Hipótesis alternativa: ( $H_1$ ): Los expertos están de acuerdo, hay consenso entre ellos ( $K \neq 0$ ).

Criterio de decisión

Si  $\chi^2_{\text{Calculada}} \leq x^2_{\alpha; p-1}$  *aceptar*  $H_0$

Si  $\chi^2_{\text{Calculada}} \geq x^2_{\alpha; p-1}$  *rechazar*  $H_0$

De la tercera ronda se obtuvo que  $K= 0,5459$ , lo que permite calcular

$$\chi^2_{\text{Calculada}} = M (P-1) K$$

$$\chi^2_{\text{Calculada}} = 54,59758$$

$$\chi^2_{(0,05, P-1)} = 18,3071.$$

Donde:

$\chi^2$ , Chi cuadrada (adimensional);  $\alpha$ , nivel de significación (adimensional); M, número de expertos (adimensional); P, proporción de error, (adimensional); K, nivel de competencia promedio (Kendall) (adimensional).

Puesto que  $\chi^2_{\text{Calculada}} > \chi^2_{\text{Tabulada}}$  se rechaza la hipótesis nula, por lo que se puede afirmar que existe concordancia entre los expertos.

A partir de la valoración realizada por los expertos se eliminaron algunos parámetros y se adicionaron otros, quedando finalmente 11 parámetros que se relacionan de acuerdo al orden de preferencia obtenido por los expertos:

- Resistencia a la compresión simple
- Resistencia a la carga puntual
- Tipo de roca
- Persistencia o continuidad
- Espaciamiento de las discontinuidades
- Orientación de las discontinuidades
- Tamaño del bloque
- Fallas
- Porosidad
- Estratificación
- Índice de calidad del macizo (*RMR*).

## **2.4 Clasificación de los parámetros en índices geológicos y geomecánicos**

A partir de la valoración realizada por los expertos quedó conformado el conjunto de parámetros para evaluar la excavabilidad del macizo rocoso. Para ello se tuvo en cuenta sus criterios coincidentes sobre cuáles debían suprimirse o agregarse.

Este conjunto de parámetros fue dividido en dos grupos: uno constituido por los índices geológicos y otro por los índices geomecánicos. Este proceder no ha sido realizado con anterioridad por ningún investigador de la rama. Sin embargo, resulta de utilidad para concretar los pasos del procedimiento que se propone y garantizar su eficacia.

Tener claridad y certeza en cuáles son los índices geológicos que se deben tomar en consideración permite efectuar el primer paso del procedimiento, mientras que, conocer cuáles son los índices geomecánicos a considerar, permite desarrollar con calidad el segundo y tercer paso de dicho procedimiento.

Esta clasificación constituye la base para la elaboración del procedimiento propuesto y considera los 11 parámetros seleccionados por los expertos.

### **1- Índices geológicos**

#### 1.1- Tipo de roca

Se deben revisar los tipos según la génesis de las litologías:

- Ígneas: intrusivas y efusivas
- Sedimentarias: químicas, detríticas, biogénicas
- Metamórficas: de grado bajo, medio o alto metamorfismo.

Características texturales:

- Tamaño de los granos minerales o clastos, forma y ordenamiento de los granos minerales. Cemento en caso de rocas sedimentarias.

### 1.2- Estructura geológica

- Primarias: contiene el tamaño del bloque, el espaciamiento y orientación de las discontinuidades, la estratificación y foliación primaria
- Secundarias: contiene la persistencia o continuidad, los pliegues, fallas, grietas, foliación secundaria, esquistosidad, clivaje pizarroso y foliación

## 2- Índices geomecánicos

- Propiedades máscas: contiene la porosidad.
- Propiedades mecánicas: contiene la resistencia a la compresión simple y a la carga puntual.
- Clasificaciones geomecánicas: contiene el índice *RMR*.

### 2.5 Estructura general del procedimiento

La estructura general del procedimiento elaborado está compuesto por cinco pasos (Figura 2.1). En los dos primeros se incluyen los parámetros geotécnicos, agrupados en índices geológicos y geomecánicos, al tomar como base los tipos de rocas, sus características estructurales y propiedades físico-mecánicas. Con esta información, en el tercer paso, se realiza la evaluación geomecánica del macizo rocoso. Posteriormente, en el paso cuatro, se determinan los dominios geomecánicos. El procedimiento termina con la elección del método de arranque en cada uno de los dominios geomecánicos en los cuales se divide el macizo rocoso (quinto paso).

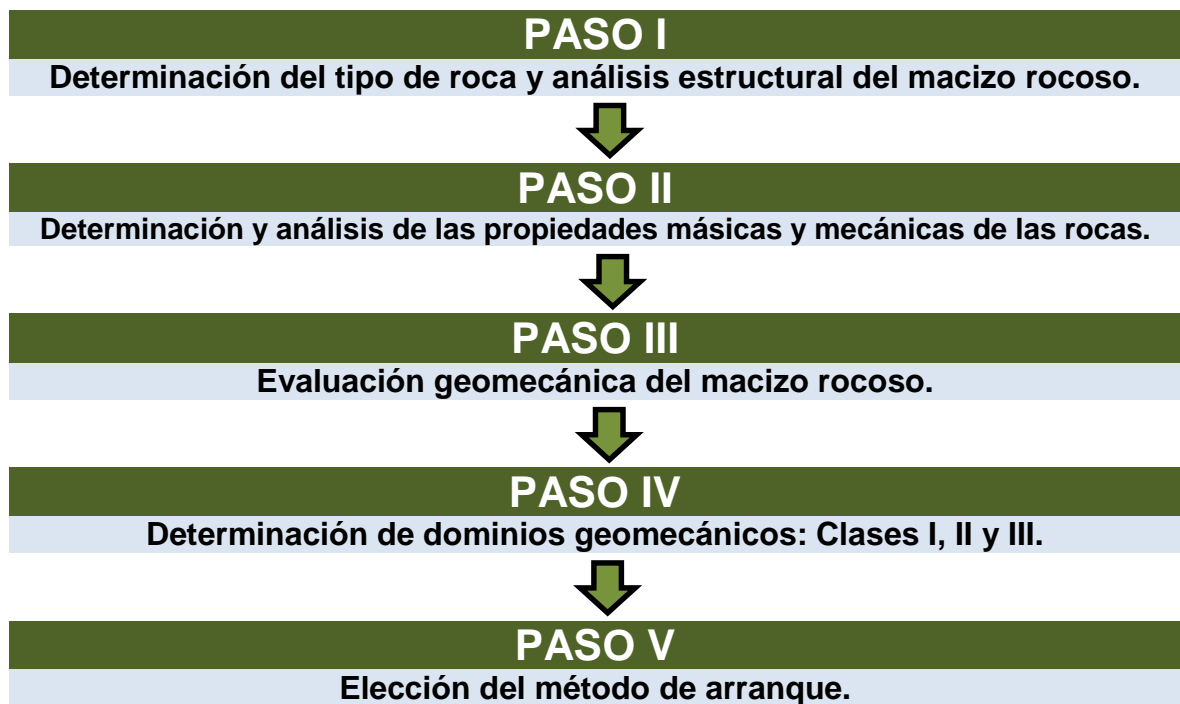


Figura 2.1 Estructura general del procedimiento.

A continuación se describen cada uno de los pasos de la estructura general del procedimiento.

### **2.5.1 Paso I. Determinación del tipo de roca y análisis estructural del macizo rocoso**

Inicialmente se realiza una recopilación y análisis de información geológica y estructural del macizo rocoso objeto de estudio. Por tanto, se deben consultar bases de datos sobre estudios previos en el macizo. Si la cantidad y calidad de los datos obtenidos no es suficiente, entonces se procede a realizar trabajos de campo que incluyen nuevos reconocimientos y mediciones en el macizo.

#### Tipo de roca

Se aplican los métodos de cartografía geológica de campo con realización de muestreo. Como resultados deben obtenerse las descripciones geológicas de los afloramientos presentes en las canteras al detallar elementos como génesis de la roca, estructura, matriz rocosa, potencia de estratos, etc. Si es necesario, pueden

confeccionarse estudios petrográficos para determinar la composición mineralógica y textural de las rocas, por lo cual se debe determinar el tipo de roca y sus características.

### Análisis estructural

Para el análisis estructural del macizo rocoso deben considerarse todas las estructuras geológicas que constituyan discontinuidades, como: grietas, fallas, estratificación, foliación secundaria, entre otras. De estas estructuras deben establecerse los siguientes parámetros.

- Elementos de yacencia: acimut de buzamiento y buzamiento
- Características de las estructuras:
  - a) Continuidad (m): extensión superficial de un plano de discontinuidades, medida por la longitud, según la dirección del plano y su buzamiento
  - b) Abertura (m): distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno
  - c) Tamaño del bloque natural (m<sup>3</sup>): condiciona el comportamiento del macizo rocoso, referido a sus propiedades de resistencias y deformaciones. El mismo se determina por la intercepción entre los planos de estructuras, como grietas y superficies de estratificación. Su descripción se puede realizar mediante la expresión:

$$J_v = \sum \frac{N_0 \text{ de discontinuidades}}{L(m)} \quad (2.1)$$

Donde:

$J_v$  – Número total de discontinuidades

$N_0$  – Número de discontinuidades

$L$  – Longitud de medida

### Características de las superficies de las grietas

Rugosidad: referido a las asperezas de las superficies de las grietas e influyen sobre el ángulo de fricción residual (grados sexagesimales) y la resistencia al corte de los planos,  $\tau$  (grados sexagesimales).

Relleno: cualquier tipo de material que rellene las aberturas formadas entre las paredes de las grietas. Las características principales que deben describirse son: naturaleza, espesor o anchura (m) y permeabilidad (%).

Espaciamiento (m): distancia perpendicular entre dos planos de discontinuidad de una misma familia de grietas. Su cálculo se realiza por la expresión:

$$e = d \cdot \text{sen} \alpha \quad (2.2)$$

Donde:

$e$ , espaciado real entre discontinuidades (m);  $d$ , distancia entre grietas medida con la cinta (m);  $\alpha$ , ángulo entre la línea de medición y la dirección de la familia.

Número de familias: se conforma por una población de grietas con yacencia semejante y condicionan el comportamiento mecánico del macizo rocoso, su modelo de deformación y sus mecanismos de rotura.

### Presencia de agua

Filtración: flujo que circula por las discontinuidades. Puede valorarse a través de humedad (%), goteo o flujos presentes en la discontinuidad.

El procesamiento de los elementos de yacencia y demás parámetros de las estructuras geológicas se realiza aplicando las técnicas de proyección estereográfica, para lo cual puede usarse el software Dip. Versión 7.001 (Rockscience, 2008). Como resultado se obtienen las familias de discontinuidades con sus características.

## **2.5.2 Paso II. Valoración de las propiedades másicas y mecánicas de las rocas**

La información sobre las propiedades másicas y mecánicas de las rocas se puede obtener por dos vías: a partir de bases de datos de estudios previos en el macizo y de nuevas mediciones realizadas. En este caso se empleó la primera, sin embargo



se realizaron comprobaciones para confirmar la veracidad y pertinencia de los datos asumidos de los informes geológicos realizados a los yacimientos.

Las propiedades que se analizan son la porosidad y la resistencia a la compresión simple. La primera sirve para fundamentar la caracterización del macizo rocoso y la segunda es utilizada porque la selección de las tecnologías o equipamientos están en función de la resistencia de los macizos a excavar.

#### ➤ **Caracterización de las variables que se analizan:**

- Porosidad (n): se determina a partir de la densidad ( $\text{kg/m}^3$ ) y la masa volumétrica ( $\text{kg/m}^3$ ), según norma cubana NC 177: 02 (2004).
- Resistencia a la compresión simple (Rc): se determina en muestras cilíndricas de 50 mm de diámetro y 50 mm de altura o en muestras cúbicas de 50 x 50 x 50 mm. También se puede utilizar la resistencia a la carga puntual según normas cubanas NC 54-32: 85 (2004) y 21:99 (2004).

Es necesario validar los datos obtenidos por la vía antes mencionada, lo cual permite determinar los errores y la confiabilidad de dichos datos. En este sentido, se muestran a continuación algunas generalidades inferidas del análisis de los datos:

- Presencia de registros de pozos con propiedades fuera del rango de valores normales
- Insuficiente cantidad de registros de pozos de exploración
- Bases de datos incompletas, con ausencia de valores de determinadas propiedades físico-mecánicas
- Bases de datos de pozos no representativas desde el punto de vista espacial para los yacimientos estudiados.

Como se aprecia, las generalidades antes relacionadas constituyen insuficiencias que justifican lo expuesto en relación con la necesidad de validación de los datos.

#### ➤ **Validación de las bases de datos**

El diseño estadístico de muestreo contempla una amplia variedad de estrategias adecuadas para generar la información que se busca. En muchas ocasiones, el

muestreo se diseña como un experimento donde se controla a priori el comportamiento simultáneo de las variables o factores independientes de interés. Al no existir factores correlacionados se evitan los experimentos redundantes. Además, los ensayos se complementan de tal modo, que la información buscada se obtiene por la combinación de todas sus respuestas.

Por otra parte, la cantidad de réplicas a realizar, necesarias para que los resultados sean representativos del proceso objeto de estudio, puede determinarse bajo la concepción de un muestreo aleatorio simple. A continuación se expone la expresión matemática para la determinación del tamaño de la muestra en un muestreo aleatorio simple, según Miller *et al.* (2005):

$$n = \left( Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{E} \right)^2 \quad (2.3)$$

Donde:

$Z_{\alpha/2}$ , estadístico de la distribución normal;  $\alpha$ , nivel de significación;  $\sigma$ , desviación típica poblacional; E, error máximo de estimación.

Para el cálculo del tamaño de la muestra o número de réplicas, pueden ser consideradas las aproximaciones  $\sigma = E$  y  $\alpha = 0,1$ , entonces:

$$Z_{\alpha/2} = 1.645 \quad (2.4)$$

Es decir, un error máximo de estimación ( $E$ ) igual a la desviación típica ( $\sigma$ ) y un nivel de confianza del 90 %. A partir de la expresión de Miller *et al.* (2005) se obtiene:

$$n = \left( Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{E} \right)^2 = (1,645)^2 = 2,706025 \text{ por tanto } n = 3 \quad (2.5)$$

### ➤ Criterio de eliminación de valores anormales

Para eliminar los valores anormales que se presentan en la base de datos de los informes geológicos utilizados se emplean dos criterios: el criterio de Student y el de las cuartilas.

El criterio de Student se basa en el hecho de que si existen valores anormales los mismos se pueden eliminar procediendo como se indica a continuación, de acuerdo con Murray (1977):

- Para el conjunto de valores obtenidos en la medición se calculan  $\bar{X}$  y  $S$  (teniendo en cuenta en estos cálculos incluso aquellos valores considerados sospechosos)
- Se establece el intervalo dado por la ecuación 2.6 y 2.7 y se elimina por considerarse como anormales todos los valores que queden fuera del intervalo establecido
- Se realizan nuevamente los cálculos necesarios para expresar el resultado elaborado o final sin considerar, como es lógico, los valores anormales.

Por otra parte el criterio de los cuartiles consiste en ordenar los datos y se calculan las cuartiles  $Q_{25}$ ,  $Q_{50} = M$  y  $Q_{75}$  y el valor  $M_i = Q_{75} - Q_{25}$ .; establecer el intervalo de datos típicos  $[M - 1,5 M_i ; M + 1,5 M_i]$ , y los datos que estén fuera del intervalo  $[M - 3 M_i ; M + 3 M_i]$  se consideran extremadamente atípicos.

### 2.5.3 Paso III. Evaluación geomecánica del macizo rocoso

Se propone utilizar dos índices de calidad, el *RQD* (Deere, 1967) y *RMR* (Bieniawski, 1979), por ser los más utilizados en excavaciones a cielo abierto.

- Índice de calidad de la roca (*RQD*).

El índice de calidad de la roca (*RQD*) se determina a partir de la siguiente expresión:

$$RQD = 115 - 3.3 \cdot J_v \quad (2.6)$$

$$J_v \Rightarrow 4,5$$

( $RQD \leq 10$ ) (%)

$J_v$ ; Familia de discontinuidades (m).

Se clasifica el macizo a partir de la propuesta de Deere (1967), actualizada por Bieniawski (1979), para ello es necesario utilizar la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Valoración referente al espaciamiento de juntas, recomendada por Bieniawski (1979)

| Descripción del espaciamiento | Espacio entre juntas | Tipo de macizo rocoso |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------|
| Muy ancho                     | > 3 m                | Sólido                |
| Ancho                         | 1-3 m                | Masivo                |
| Moderadamente cerrado         | 0,3 – 1 m            | En bloques            |
| Cerrado                       | 50 – 300 mm          | Fracturado            |
| Muy cerrado                   | < 50 mm              | Triturado             |

Para definir las condiciones de la junta se deben tener presente los siguientes parámetros: abertura, persistencia o continuidad (Tabla 2.2), rugosidad, relleno.

Tabla 2.2 Clasificación de la persistencia o continuidad de las trazas de las grietas

| Descripción | Persistencia o continuidad (m) |
|-------------|--------------------------------|
| Muy baja    | < 1                            |
| Baja        | 1 – 3                          |
| Media       | 3 – 10                         |
| Alta        | 10 – 20                        |
| Muy alta    | > 20                           |

### ➤ Índice de clasificación de la masa rocosa (*RMR*)

Para determinar el *RMR* propuesto por Bieniawski (1979) se utilizan las Tablas 2.3, 2.4 y 2.5 y se definen sus características al describir los siguientes parámetros:

Análisis estructural, del mismo se tiene en cuenta:

- a) Espaciamiento
- b) Condiciones de la junta
- c) Orientación.

Resistencia de la roca:

- a) Carga puntual

b) Compresión simple.

RQD.

Aguas subterráneas.

Tabla 2.3 Clasificación de los parámetros y sus valores

| Parámetros                     |                                    | Escala de valores   |  |   |  |   |                           |                          |
|--------------------------------|------------------------------------|---|--|---|--|---|---------------------------|--------------------------|
| Resistencia de la roca intacta | Carga puntual                      | 80 kg/cm <sup>2</sup>                                     | 40-80 kg/cm <sup>2</sup>                                     | 20-40 kg/cm <sup>2</sup>                                      | 10-20 kg/cm <sup>2</sup>   | 10 kg/cm <sup>2</sup>   |                           |                          |
|                                | compresión simple                  | 2000 kg/cm <sup>2</sup>                                   | 1000-2000 kg/cm <sup>2</sup>                                 | 500-1000 kg/cm <sup>2</sup>                                   | 250-500 kg/cm <sup>2</sup>   | 100 - 250 kg/cm   | 30-100 kg/cm <sup>2</sup> | 10-30 kg/cm <sup>2</sup> |
| Valor                          |                                    | 15  | 12   | 7   | 4  | 2   | 1                         | 0                        |
| RQD                            |                                    | 90-100%   | 75-90%   | 50-75%  | 25-50%   | 25%   |                           |                          |
| Valor                          |                                    | 20  | 17   | 13  | 8  | 3   |                           |                          |
| Espaciado de juntas            |                                    | 3m  | 1-3m   | 0.3-1m  | 50-300mm   | 50mm  |                           |                          |
| Valor                          |                                    | 30  | 25   | 20  | 10   | 5   |                           |                          |
| Condición de juntas            |                                    | Muy rugosas sin continuidad cerrada, paredes de roca dura | Ligeramente rugosa <1mm. de separación. Paredes de roca dura | Ligeramente rugosa <1mm. de separación. Paredes de roca suave | Espejo de falla o relleno de espesor < 5mm ó abiertos 1-5mm, fisuras cont. | Relleno blando de espesor < 5mm ó abiertas < 5mm, fisuras continuas |                           |                          |
| Valor                          |                                    | 25  | 20   | 12  | 6  | 0   |                           |                          |
| Aguas subterráneas             | Cantidad infiltración 10m de túnel | Ninguna   |  | 25 litros/min   | 25-125 litros/min  | >125 litros/min   |                           |                          |
|                                | Presión de agua                    | Cero  |  | 0.0-0.2   | 0.2-0.5  | 0.5   |                           |                          |
|                                | Situación general                  | Totalmente seco   |  | Solo húmedo, agua intersticial                                | Ligera presión de agua   | Serios problemas de agua  |                           |                          |
| Valor                          |                                    | 10  |  | 7   | 4  | 0   |                           |                          |

Tabla 2.4 Ajuste de valores por orientación de las juntas

| Orientación del rumbo y buzamiento de las diaclasas |               | Muy favorable | Favorable | Regular | Desfavorable | Muy desfavorable |
|---|---------------|---------------|-----------|---------|--------------|------------------|
| Valores   | Túneles       | 0             | -2        | -5      | -10          | -12              |
|   | cimentaciones | 0             | -2        | -7      | -15          | -25              |
|   | Taludes       | 0             | -2        | -25     | -50          |                  |

Tabla 2.5 Tabla de categorías de clasificación geomecánica (Bieniawski, 1979)

| <b>R.M.R.</b> | <b>Calificación del Macizo Rocoso</b> | <b>Clase</b> |
|---------------|---------------------------------------|--------------|
| 81 - 100      | Muy bueno                             | I            |
| 61-80         | Bueno                                 | II           |
| 41-60         | Medio                                 | III          |
| 21-40         | Malo                                  | IV           |
| 0-20          | Muy malo                              | V            |

#### **2.5.4 Paso IV. Determinación de dominios geomecánicos**

En este trabajo se introduce el término dominios geomecánicos, el cual se define como sectores o áreas con semejante comportamiento de las características geomecánicas del macizo rocoso referidas a semejanzas litológicas y estructurales.

El procedimiento para obtener los dominios geomecánicos se realiza sobre un sistema de información geográfica (SIG). Como resultado se obtiene un plano de dominios que se logra a partir de la integración de planos de factores geológicos y geomecánicos.

Como parte del proceso de integración de planos se realiza la superposición de diferentes gráficos y datos, con ayuda de un S/G. La superposición entre capas ha sido definida por Burrough (1986, 1988) como “el proceso de superponer representaciones digitales de varios conjuntos de datos espaciales, unos sobre otros, de manera que cada posición en el área cubierta puede ser analizada en términos de dichos datos”.

La información obtenida en los pasos anteriores (I, II y III) mediante la revisión y el análisis de varias bases de datos, trabajos de cartografía geológica de campo, muestreo y análisis de laboratorios es digitalizada y procesada, obteniéndose bases de datos con las cuales se confeccionan los planos temáticos. Por medio de estos datos se definen los factores geológicos y geomecánicos con los cuales se determinan los dominios geomecánicos.

Factores Geológicos: Aportan las características básicas del yacimiento que condicionan el tipo de materia prima a extraer, para lo cual se utiliza el plano litológico y tectónico del yacimiento.

- a) Plano litológico del yacimiento. Se delimitan las litologías de acuerdo al plano geológico detallado y se clasifican de acuerdo con la calidad requerida desde el punto de vista tecnológico. En las canteras que llevan un determinado tiempo en explotación se recomienda realizar trabajos de reconocimiento de campo para actualizar el mapa geológico del mismo.
- b) Plano tectónico: Se deben realizar estudios detallados de la estructura del yacimiento teniendo en cuenta el agrietamiento y las fallas. Se parte del plano geológico del área y las fallas deben ser confirmadas por medio de reconocimientos de campo y estudios geomorfológicos.

Factores Geomecánicos: Se confeccionan bases de datos y planos que recopilen las propiedades físicas, mecánicas y calidad geomecánica de las rocas y el macizo rocoso del yacimiento.

Parámetros geomecánicos.

Calidad geomecánica: se realizan planos que muestran la distribución espacial de la calidad del macizo rocoso en los yacimientos a partir del índice *RMR* (*rock mass rating*; Bieniawski, 1973, 1976, 1979).

Planos de isolíneas de las propiedades mecánicas de las rocas a partir de la información de los pozos y puntos de muestreo.

### **Aplicación de técnicas de evaluación multicriterio (EMC) para la obtención de dominios geomecánicos**

La evaluación multicriterio se define como un conjunto de técnicas orientadas para el asesoramiento en los procesos de toma de decisiones. Su fin básico es investigar un número de alternativas bajo la luz de múltiples criterios y objetivos en conflictos (Voogd, 1983).

Para minimizar el margen de error debido a la influencia del factor humano se utilizan las técnicas de EMC, basadas en la ponderación y compensación de las variables que influyen sobre la actividad objeto de decisión, los cuales deben ser inventariados y clasificados previamente (Gómez y Barredo, 2005).

Las técnicas EMC se desarrollan en cuatro etapas, descritas a continuación:

Etapa 1: Selección de los criterios (parámetros) para la determinación del método de arranque

La selección de los criterios se realizó durante el desarrollo del epígrafe 2.1.

Etapa 2: Asignación del valor a las clases que integran cada criterio utilizado

Se seleccionan 5 criterios o parámetros, los cuales se dividen en tres clases en función de los tres tipos de dominios (clase I, II y III), exceptuando la calidad del macizo que se divide en 5 clases según los valores de *RMR*. A cada una de las clases se le asigna un puntaje o valor, el cual será utilizado para su procesamiento mediante el empleo de los *SIG*. Esto se realiza con el empleo del mismo enfoque citado en los trabajos de Van Westen (1995).

Al mismo tiempo, la utilización del criterio de expertos expuesto anteriormente otorga cada valor según la importancia o nivel de significación que tenga para el fenómeno estudiado. Con el objetivo de mantener una misma escala de información, todos los pesos asignados a las clases que integran los criterios fueron considerados entre los valores de 1 y 10 (escala que se toma de forma racional, de acuerdo a los intereses del investigador), otorgándose el menor o mayor valor en dependencia de la importancia o nivel de significación que tenga (Tabla 2.6).

Tabla 2.6 Matriz de evaluación de los criterios de selección

| Matriz de evaluación |            | Clases o alternativas           | Valor de las clases   |    |
|----------------------|------------|---------------------------------|---|----|
| Criterios            | Geológicos | Tipo de roca                    | Granitos, gneis, dioritas, porfiritas, gabro.<br>Calizas cristalinas muy duras, masivas | 10 |
|                      |            |                                 | Calizas, calizas margosas, margas, caliza dura dolomitizada, dolomita dura              | 6  |
|                      |            |                                 | Calizas blandas, calizas margosas blandas, margas.                                      | 1  |
|                      |            | Estructura geológica del macizo | Masiva, bandeada.<br>Estratificación masiva.  | 10 |
|                      |            |                                 | Ígneas moderadamente agrietadas. Estratificación masiva a media.                        | 6  |
|                      |            |                                 | Ígneas muy agrietadas. Estratificación media a muy fina.                                | 1  |



|      |              |   |          |    |
|------|--------------|---|----------|----|
|      | Geomecánicos | Espaciamiento de discontinuidades (m)   | 6-1      | 10 |
|      |              |   | 0.2-1    | 8  |
|      |              |   | 0.2-0.06 | 1  |
|      |              | Resistencia a la compresión axial (MPa) | > 50     | 10 |
|      |              |   | < 50     | 8  |
|      |              |   | < 50     | 1  |
|      |              | Calidad Geomecánica del macizo (RMR)    | 81-100   | 10 |
|      |              |   | 61-80    | 8  |
|      |              |   | 41-60    | 6  |
|      |              |   | 21-40    | 4  |
| 0-20 | 2            |   |          |    |

### Etapa 3: Evaluación de prioridades de los criterios

El nivel de importancia que representa cada criterio en el análisis se obtiene de los resultados del Método Delphi que permite disminuir el nivel de incertidumbre y subjetividad asociado con las decisiones humanas. La posición jerárquica de cada criterio fue definido por el valor promedio de los puntajes asignados por el grupo de expertos y una vez precisada la posición del criterio se procedió a ponderarlos (Astiparraga, 1999).

Existen diferentes métodos de ponderación (Gómez y Barredo, 2005). En este caso se utiliza el Método de la Suma (Manual del Proceso de Ordenamiento Ecológico, 2006) para calcular los pesos ponderados (Tabla 2.7). Los pesos se calculan a partir de la siguiente expresión:

$$W_j = \frac{n - r_j + 1}{\sum(n - r_k + 1)} \quad (2.7)$$

$W_j$ , peso ponderado del criterio  $j$ ;  $n$ , cantidad de criterios considerados en el análisis;  $r_j$ , posición jerárquica del factor  $j$  que ocupa el criterio y  $r_k$  es la suma de todos los valores de orden asignados.

Tabla 2.7 Matriz de jerarquía y peso de los criterios

| Criterios                         | Puntaje o peso asignado (Método Delphi) | Posición jerárquica (r) | Peso ponderado $W_j = \frac{n - r_j + 1}{\sum(n - r_k + 1)}$ |
|-----------------------------------|---|-------------------------|--|
| Resistencia a la compresión axial | 0,30                                    | 1                       | 0,33   |

|                                   |      |                         |      |
|-----------------------------------|------|-------------------------|------|
| Estructura geológica del macizo   | 0,25 | 2                       | 0,26 |
| Espaciamiento de discontinuidades | 0,20 | 3                       | 0,20 |
| Tipo de roca                      | 0,15 | 4                       | 0,13 |
| Calidad Geomecánica del macizo    | 0,10 | 5                       | 0,06 |
| Total                             | 1,00 | $\sum(n - rk + 1) = 15$ | 0,99 |

#### Etapa 4: Aplicación de técnicas de evaluación multicriterio

En las técnicas compensatorias de EMC los pesos de los criterios deben establecerse de manera numérica. Desde el punto de vista operativo y de tratamiento de los datos, las técnicas compensatorias se basan en la suposición de que un valor alto de una alternativa en un criterio, puede compensar un valor bajo de la misma alternativa en otro criterio.

En este estudio se propone aplicar la técnica Sumatoria Lineal Ponderada (*scoring*) (Gómez y Barredo, 2006) que es un método de EMC, utilizado ampliamente en el mundo y consiste en la suma lineal del producto de los pesos ponderados de cada criterio por el valor asignado a las clases que lo integran (peso de cada atributo de la clase), a partir de la siguiente ecuación:

$$R_i = \sum_{j=1}^n W_j V_{ij} \quad (2.8)$$

Donde:

$R_i$ , nivel de adecuación de la alternativa  $i$ ;  $n$ , número de criterios;  $W_j$ , peso del criterio  $j$  en la clase;  $V_{ij}$ , peso ponderado de la alternativa  $i$  en el criterio  $j$ .

Como se muestra en la Figura 2.2, a partir de la digitalización de la información y su posterior procesamiento digital se obtienen los dominios geomecánicos, al combinar toda la información geológica y geomecánica del macizo rocoso, utilizando un SIG. Los dominios se clasifican en tres tipos: clase I, clase II y clase III. A continuación se detalla el procedimiento de obtención de los dominios.

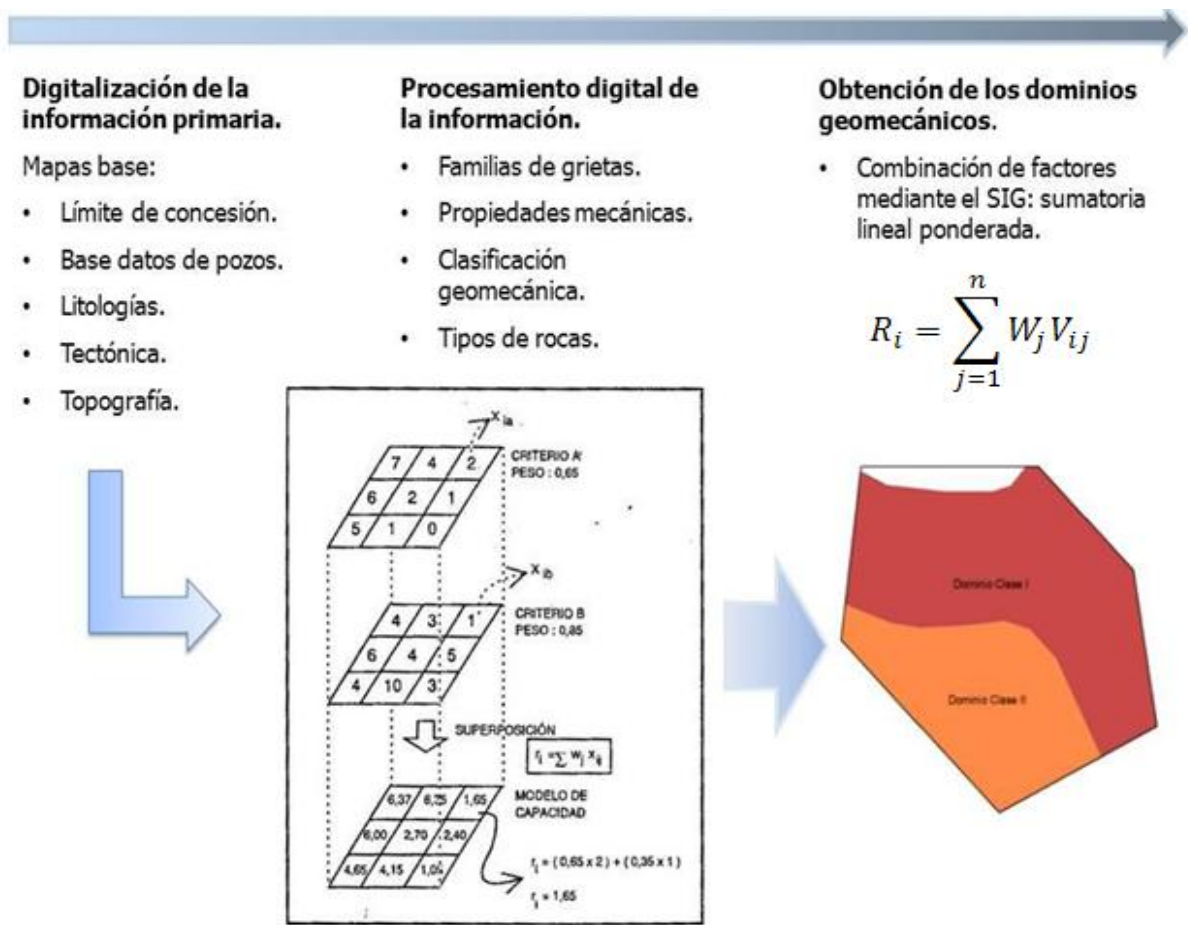


Figura 2.2 Esquema para la obtención de los dominios geomecánicos.

### Obtención de dominios geomecánicos

La obtención de los dominios se realiza mediante un *SIG* a través de los siguientes pasos:

Creación de planos: Los planos iniciales están elaborados en formato vectorial; es decir, conformados por polígonos, líneas o puntos.

Ejemplos:

- a) Plano litológico: polígonos que definen las áreas de diferentes tipos de rocas o formaciones
- b) Plano tectónico: líneas que definen las trazas de las líneas de fallas
- c) Plano de pozos: puntos que definen cada pozo.

Valoración de planos: Cada plano está acompañado de una tabla de atributos donde se caracteriza cada litología, falla o pozo. En esa tabla se añade el valor de las clases definidas en cada plano. (Ver tabla o matriz de valoración, Tabla 2.6). Esto significa que mediante la EMC se cuantifican las clases de los planos, o sea, que a las litologías o formaciones se les asignan un valor en función de su nivel de importancia en la determinación de dominios. Este paso permite realizar operaciones matemáticas posteriores entre los planos.

Rasterización de planos: Los planos, que están inicialmente conformados en formato vectorial, se convierten a formato raster teniendo en cuenta la clase valorada y con un determinado tamaño de píxel de acuerdo con la escala detallada de la cantera. Para la investigación se utilizaron tamaños de píxel de 5x5 m.

Álgebra de planos: En esta etapa se realiza la operación matemática definida a través del método de EMC, elegido como sumatoria lineal ponderada, en la cual se suman cada plano multiplicado por un peso o nivel de importancia en la delimitación de dominios. Como resultado se obtiene un plano en formato raster con valores obtenidos por la sumatoria de todos los planos bases iniciales.

Obtención de los dominios geomecánicos: Una vez obtenido el plano final resultante del álgebra de planos, éste se clasifica en clases de acuerdo con la matriz final de combinación de cada plano. Los valores más elevados se relacionan con sectores de rocas masivas, muy duras, espaciamiento grande y de calidad geomecánica de muy buena a buena. Por el contrario, los valores más bajos se relacionan con rocas finamente estratificadas o tectonizadas, espaciamientos muy pequeños y calidad geomecánica mala o muy mala.

Las fronteras entre los dominios se determinan por el comportamiento estadístico de los valores finales de las clases, aplicando las técnicas de EMC en el *SIG* mediante el método de sumatoria lineal ponderada. La clasificación se realiza con la aplicación del método estadístico de optimización, llamado rupturas naturales, Jenks (1967), que está implementado en el *SIG*. Este método persigue el doble propósito de obtener clases de gran homogeneidad interna, con máximas diferencias entre las clases para el número de intervalos que se haya especificado previamente.

### 2.5.5 Paso V. Elección del método de arranque

Una vez determinados los dominios geomecánicos del macizo, se procede a elegir el posible método de arranque de las rocas en las áreas que ocupan cada uno de los dominios. Para la elección del método de arranque, es necesario considerar todos los elementos o características que poseen los dominios que condicionan la aplicación de un método de arranque u otro.

Asimismo, para decidir el rango de variación de los índices geológicos y geomecánicos que integran el procedimiento propuesto, que permiten elegir el método de arranque, se realizó una minuciosa revisión de los trabajos de Karpuz (1990) y Pettifer y Fookes (1994), así como de diversas tablas de propiedades físico-mecánicas (Bieniawski, 1976, 1979; Deere, 1967). También se recopiló información geológica y geomecánica de canteras para áridos de Cuba oriental.

En esta región de Cuba se explotan 16 canteras para áridos, de las cuales 15 se desarrollan en rocas sedimentarias, calizas y una en rocas ígneas, porfirita. Se recopiló información de 6 de estas canteras, 5 de calizas y una de porfirita.

Las rocas sedimentarias e ígneas que conforman los macizos rocosos de las canteras para áridos en Cuba oriental poseen estructuras geológicas variadas: masivas, bandeadas, agrietadas, muy agrietadas, estratificación masiva, media y fina. Generalmente las rocas sedimentarias están representadas por diferentes variedades carbonatadas; es decir, calizas, margas y dolomitas.

Los rangos de variaciones de los índices geomecánicos en estas canteras fueron tomados de los informes geológicos de las mismas y se muestran en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Rangos de variaciones de los índices geomecánicos en canteras para áridos de Cuba oriental

| Rangos | Pv (kg/m <sup>3</sup> ) | Absorción (%) | Porosidad (%) | Rc (MPa) |
|--------|-------------------------|---------------|---------------|----------|
| Mínimo | 2,16                    | 0,25          | 0,74          | 9,4472   |
| Máximo | 6,6                     | 18,91         | 17,55         | 115,1    |

A partir de la revisión y análisis de todos los materiales e información mencionada, se decidió clasificar los macizos rocosos en tres tipos de dominios con características específicas para los índices geológicos y geomecánicos.

El procedimiento presentado combina los tipos de rocas del macizo y su estructura con su calidad para determinar el tipo de dominio geomecánico (Clase I, II y III) y elegir el método de arranque de las rocas. Esta combinación de factores geológicos y geomecánicos diferencia a este procedimiento de otras metodologías para elegir el método de arranque; por ejemplo, el método gráfico propuesto por Karpuz (1990), donde solo considera los valores del índice de carga puntual y el espaciamiento entre grietas para elegir el método de arranque.

A continuación se describen los índices geológicos y geomecánicos de dichos dominios y se proponen los métodos de arranque respectivos:

### **Dominio Clase I.**

Índices geológicos:

1. Tipo de roca: ígneas, metamórficas. Calizas cristalinas muy duras y masivas
2. Estructura: masiva, bandeada, estratificación masiva

Índices geomecánicos:

1. Espaciamiento (m):  $\geq 1$
2. Tamaño de bloque: muy grande
3. Resistencia a la compresión (MPa)
  - Índice de carga puntual:  $> 2,5$
  - Compresión simple:  $> 50$
  - Descripción: resistencia fuerte a extremadamente fuerte
4. Calidad geomecánica
  - RMR: 100-61

Descripción: muy buena-buena

**Método de arranque:** voladura o mecánico, en su variante escarificación extremadamente difícil.

### **Dominio Clase II.**

Índices geológicos:

1. Tipo de roca: ígneas, metamórficas. Calizas, calizas margosas, margas, caliza dura dolomitizada y dolomita dura
2. Estructura: agrietada, estratificación masiva a media

Índices geomecánicos:

1. Espaciamiento (m):  $> 0,2$  y  $< 1$
2. Tamaño de bloque: medianos a grandes
3. Resistencia a la compresión (MPa)
  - Índice de carga puntual:  $< 2,5$
  - Compresión simple:  $< 50$
  - Descripción: resistencia media a extremadamente débil
4. Calidad geomecánica
  - RMR: 80-21

Descripción: buena-media-mala

**Método de arranque:** mecánico, en sus variantes escarificación extremadamente difícil, muy difícil y difícil.

### **Dominio Clase III.**

Índices geológicos:

1. Tipo de roca: ígneas, metamórficas. Calizas blandas, calizas margosas blandas, margas
2. Estructura: muy agrietada, estratificación media a fina

Índices geomecánicos:

1. Espaciamiento (m):  $\leq 0,2$
2. Tamaño de bloque: pequeños a muy pequeños
3. Resistencia a la compresión (MPa)
  - Índice de carga puntual:  $< 2,5$
  - Compresión simple:  $< 50$
  - Descripción: resistencia media a extremadamente débil
4. Calidad geomecánica

RMR: < 40

Descripción: mala-muy mala

**Método de arranque:** Mecánico, en sus variantes escarificación fácil.

## 2.6 Diagrama del procedimiento propuesto

El diagrama desarrollado para ejecutar el procedimiento propuesto y que se muestra en la Figura 2.3, parte de los tipos de rocas que conforman el macizo y del análisis de las características geológicas y las propiedades físico-mecánicas del macizo rocoso.

La información para proceder a la aplicación del diagrama en los yacimientos que se encuentran en explotación, puede ser la obtenida de trabajos previos realizados en el yacimiento o de nuevos estudios realizados para el fortalecimiento del conocimiento geológico y geomecánico del mismo. Independientemente de la procedencia de la información, los datos se validan para conocer la confiabilidad de la información obtenida.

A continuación se realiza el procesamiento, la representación e interpretación de toda la información geológica (tipos de rocas, tectónica, etc.) y geomecánica del macizo. Después se realiza la evaluación geomecánica del macizo, para la cual se considera la resistencia de las rocas intactas, el RQD, el espaciamiento entre grietas, las condiciones de las juntas y la presencia de agua. De la suma de estos cinco factores se obtiene el *RMR*. A este se le realiza un ajuste por orientación de las discontinuidades en taludes, debido a que contempla la explotación de canteras.

Las orientaciones pueden clasificarse en 4 tipos: muy favorables ( $0^\circ$ ), favorables ( $< 5^\circ$ ), regular ( $< 25^\circ$ ) y desfavorable ( $< 50^\circ$ ). A partir de estos resultados se realiza la clasificación geomecánica sobre la calidad del macizo, en cinco clases: muy buena (I), bueno (II), medio (III), malo (IV) y muy malo (V). Con ayuda de los resultados anteriores se determinan los dominios geomecánicos, al considerar los tipos de rocas, sus características estructurales (A, B y C, ver descripción en Figura 2.3) y la calidad del macizo.



Los dos primeros elementos combinados con la calidad del macizo determinan el tipo de dominio, y con ello, el método de arranque. Por ejemplo, si el macizo está compuesto por rocas ígneas o metamórficas y estas no se encuentran afectadas tectónicamente, entonces la estructura geológica es de tipo A, y adquiere un valor de 10. Con estas condiciones, a partir de la sumatoria de los cinco parámetros antes referidos se obtiene un *RMR* que permite clasificar el macizo como clase I o II, para el cual se propone utilizar los métodos de arranque, voladura y escarificación extremadamente difícil.

La selección del método de arranque depende de la combinación de los índices de carga puntual ( $I_s$ ) y espaciamiento ( $J_v$ ). Cuando el índice de carga puntual es mayor de 3 MPa se elige voladura, de lo contrario, se opta por la escarificación extremadamente difícil.

En otro ejemplo, si las rocas ígneas y metamórficas se encuentran afectadas tectónicamente, pero el nivel de agrietamiento no es muy alto, entonces la estructura geológica es de tipo B, y adquiere un valor de 6. Los valores de *RMR* pueden clasificar el macizo como clase II, III y IV que define un dominio geomecánico de clase II para el cual se propone utilizar el método de arranque mecánico en sus variantes escarificación extremadamente difícil, muy difícil y difícil.

Esta misma secuencia del diagrama es válida para rocas sedimentarias duras y compactas. La elección del método de arranque mecánico depende de los valores de  $I_s$  y  $J_v$ . Si  $J_v$  es mayor de 1 m, se debe utilizar la escarificación extremadamente difícil. Si  $J_v$  varía entre 1-0,6 m se utiliza escarificación muy difícil, mientras que si  $J_v < 0.6$  m se emplea la escarificación difícil.

Otro ejemplo de aplicación de este procedimiento sería cuando el macizo se conforma de rocas sedimentarias blandas y poco compactas. En este caso presenta una estructura geológica de tipo C y el macizo puede clasificarse en las clases IV o V, según el *RMR*. Estas características incluyen a este caso dentro del dominio clase III para el cual también se propone utilizar el método de arranque mecánico, en su variante escarificación fácil.

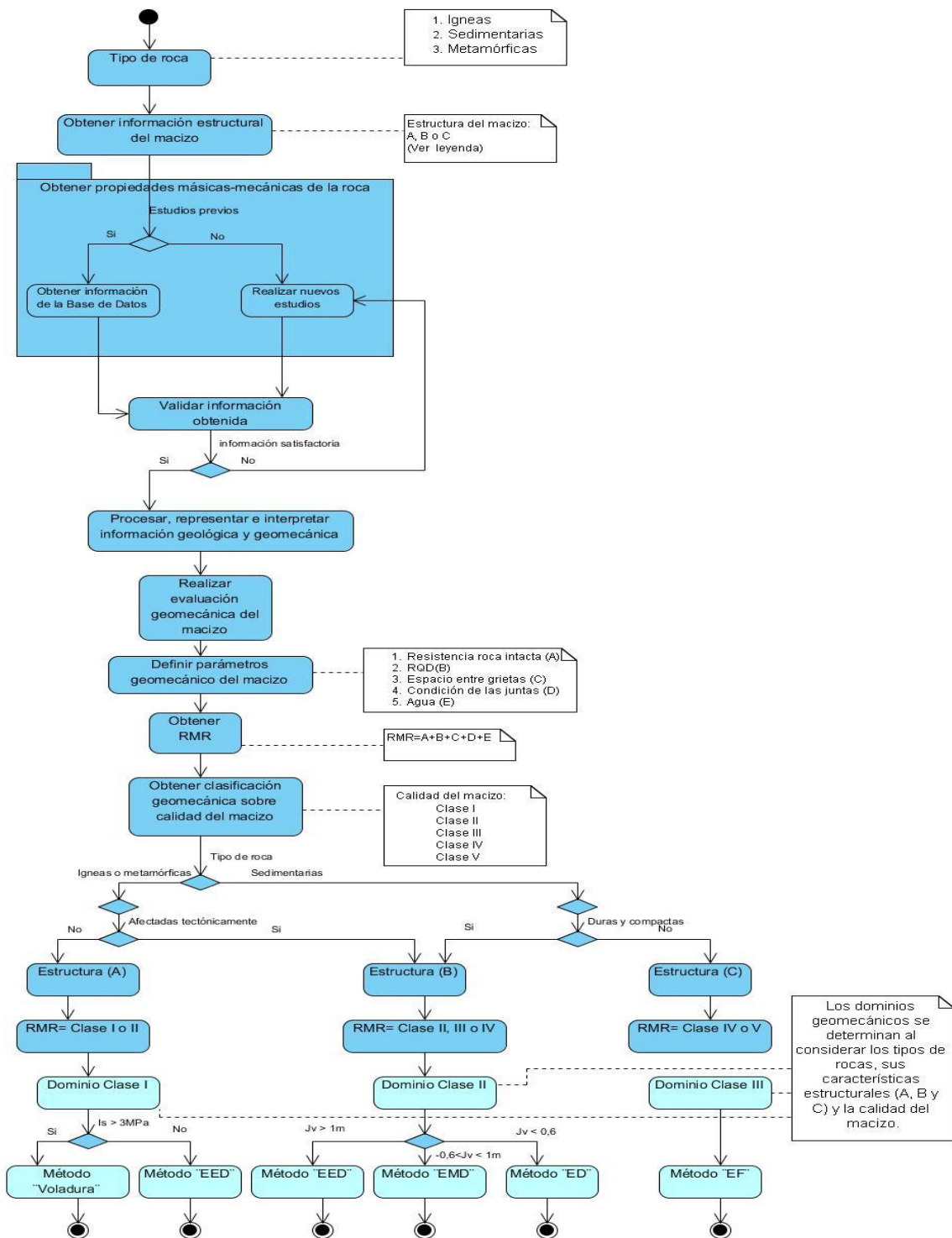


Figura 2.3. Diagrama del procedimiento propuesto. A: Estructura masiva, bandeada y estratificación masiva; B: Estructura ígneas moderadamente agrietadas, rocas estratificadas, estratificación masiva a media; C: Estructura ígneas muy agrietadas, rocas estratificadas, estratificación media a muy fina. Is: índice de carga puntual; Jv: espaciamento entre grietas; EED: Escarificación extremadamente difícil; EMD: Escarificación muy difícil; ED: Escarificación difícil; EF: Escarificación fácil.

## **2.7 Conclusiones**

En este capítulo quedan establecidos, a partir de la utilización del Método Delphi con el criterio de los expertos, los 11 parámetros que determinan la excavabilidad del macizo rocoso, clasificados en índices geológicos y geomecánicos, cuya integración diferencia el procedimiento propuesto de las metodologías propuestas por otros autores.

El establecimiento de los dominios a partir de los índices geológicos y geomecánicos constituye una novedad científica de la investigación al tiempo que resulta un aporte práctico, al permitir la división de los macizos rocosos en sectores, bloques o cuerpos, llamados dominios en este informe, caracterizados por condiciones geológicas y geomecánicas similares.

Otro resultado importante alcanzado en este capítulo es la elaboración del diagrama mediante el cual se desarrolla el procedimiento.

## **CAPÍTULO III. VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO**

### **3.1 Introducción**

El establecimiento de un procedimiento para la elección del método de arranque en canteras para áridos requiere de su validación, para lo cual inicialmente se seleccionan varios casos de estudio, considerando el nivel de representatividad de sus características geológicas y geomecánicas promedio.

Para la elección de los casos de estudio se tiene en cuenta que en Cuba existen más de 100 canteras en las que se explotan rocas calizas y margas, y más de 30 conformadas por rocas ígneas. Además, se consideran diferentes entornos geológicos, con diversidad en relación a la génesis de sus formaciones, estructura primaria de las rocas y sus características geomecánicas.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto, se valoraron cinco casos de estudio en yacimientos de calizas: La Inagua, Yarayabo, 200 mil, El Cacao y Pilón, y se seleccionaron los dos últimos, los cuales se diferencian por su composición, yacencia y grado de tectonismo. En el caso del yacimiento en rocas ígneas se investigó directamente Los Guaos, por ser el único de la región Cuba oriental que tienen esta característica. La ubicación de esos yacimientos está representada gráficamente en la Figura 3.1.

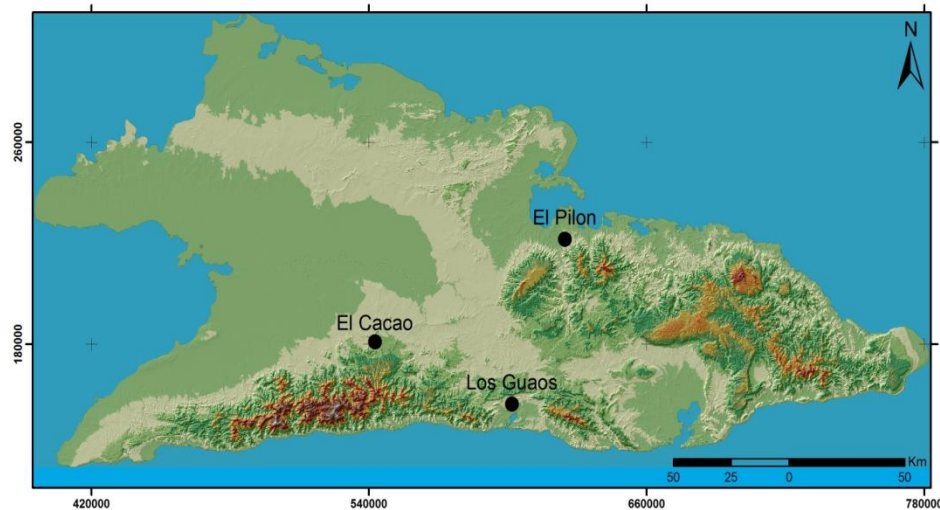


Figura 3.1 Ubicación de los casos de estudio.

Mediante la aplicación del procedimiento pueden presentarse dos situaciones:

- Coincidencia entre el método de arranque utilizado en la cantera y el propuesto por el procedimiento. En algunos casos, a pesar de existir coincidencia pueden presentarse problemas de bloques sobredimensionados o de tamaños muy pequeños así como otros problemas del minado, debido a la no integración de todos los índices geológicos y geomecánicos.
- No coincidencia entre el método de arranque utilizado y el propuesto por el procedimiento, lo que ocasionará bloques de tamaño no deseado, lo que implica a su vez mayor complejidad en el proceso extractivo.

Esas mismas situaciones pueden presentarse en las validaciones realizadas durante la presente investigación, las que se realizarán siguiendo cada uno de los pasos del procedimiento. A partir de ello se obtendrán conclusiones en cada yacimiento en dependencia de los resultados obtenidos.

### 3.2 Primer caso de estudio: El Cacao

#### 3.2.1 Características geológicas del yacimiento

En el noreste de la provincia Granma se ubica la cantera El Cacao (Figura 3.1 y 3.2). Las coordenadas geográficas del centro del yacimiento son: X: 542538; Y: 180753.

En esta región afloran rocas sedimentarias y volcánicas del Cenozoico (Iturralde-Vinent, 1996). Las rocas volcánicas forman parte del Grupo el Cobre de edad Paleoceno-Eoceno Medio, representado por tobas psamíticas, brechas tobáceas calcáreas y lavas, así como lavas de porfiritas andesíticas. Sobreyaciendo a las rocas volcánicas aparecen calizas organógenas, detríticas y pelitomórficas con diferente grado de recristalización y pertenecientes a la Formación (Fm) Charco Redondo de edad Eoceno Medio. Encima de esta última, durante el Eoceno Medio-Superior se depositaron areniscas, margas, calizas arcillosas y conglomerados de la Fm. San Luis.

En el macizo rocoso donde se ubica la cantera El Cacao afloran calizas que en ocasiones están en contacto con rocas volcánicas (Figura 3.3). Este macizo posee grietas en varias direcciones, muchas veces rellenas por arcillas y calcita recristalizada. En la parte sur del macizo afloran calizas y areniscas calcáreas estratificadas.



Figura 3.2 Plano geológico del extremo noreste de la provincia Granma (Tomado de Hernández, 2011).

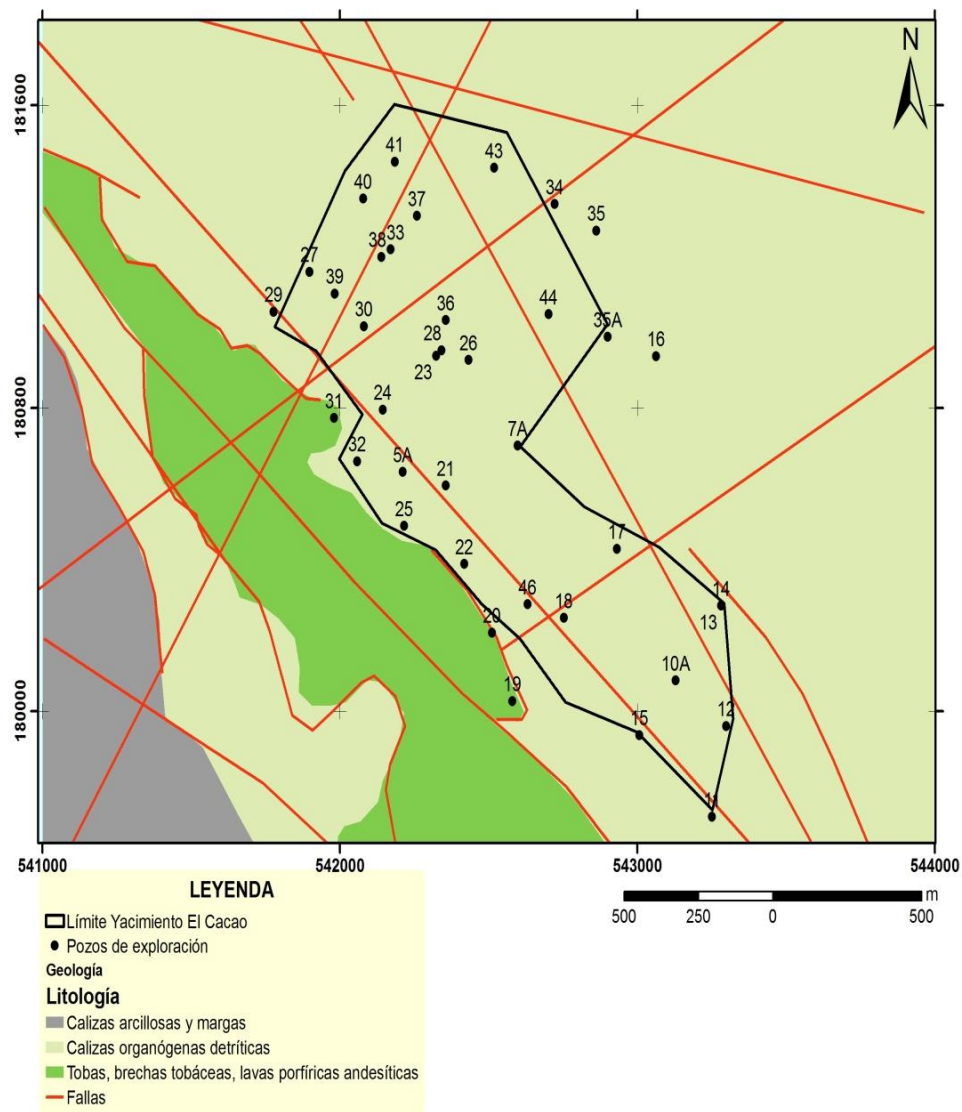


Figura 3.3 Plano geológico del yacimiento El Cacao (Tomado de Hernández, 2012).

### Análisis estructural del macizo rocoso

Los datos estructurales del macizo rocoso fueron tomados de Alexandre, (2006). La revisión y análisis de los datos estructurales arroja que los mismos se encuentran dentro de los intervalos aceptados (ejemplo, el buzamiento de 0 a 90 grados). Una vez validados los datos, se realiza su procesamiento y se obtienen tres familias de discontinuidades en el macizo, las cuales se pueden observar en los diagramas de contorno, planos y rosetas (Figuras 3.4 y 3.5).

Las direcciones que predominan son Familia 1:  $83^{\circ}/303^{\circ}$ , Familia 2:  $78^{\circ}/244^{\circ}$  y Familia 3:  $09^{\circ}/042^{\circ}$ . Las familias 1 y 2 son de buzamiento alto, superiores a 70 grados; mientras que la familia 3 es de buzamiento sub-horizontal, representando la yacencia de los estratos de las rocas carbonatadas.

En la Tabla 3.1 se presenta la caracterización del agrietamiento en la cantera El Cacao. El espaciado característico para las familias 1, 2 y 3 son: 0,85, 1,43 y 0,59 m respectivamente, clasificadas como moderadamente espaciadas la 1 y la 3 y espaciada la familia 2.

Las aberturas que predominan en la familia 1, 2 y 3 son: 1,09, 1,53 y 0,04 mm respectivamente, clasificadas como moderadamente abiertas la 1 y 2 y cerrada la familia 3.

De acuerdo con (Vincent *et al.*, 1983; Alexandre, 2006), las grietas no presentan signos de humedad ni filtración de agua a través de sus superficies.

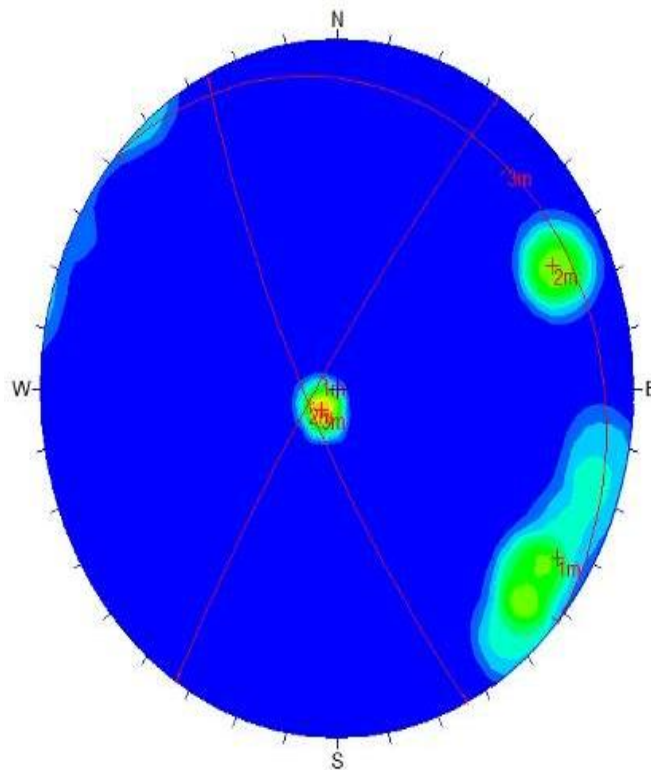


Figura 3.4 Diagrama de contorno y planos del agrietamiento de El Cacao (Tomado de Alexandre, 2006).



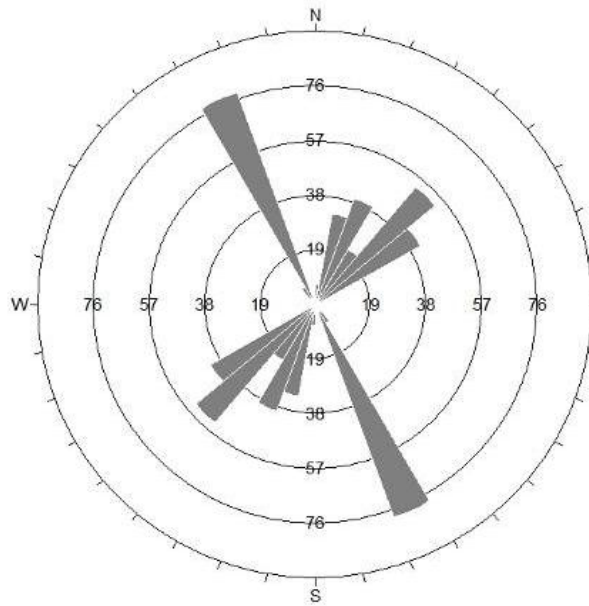


Figura 3.5 Diagrama de rosetas del agrietamiento en El Cacao (Tomado de Alexandre, 2006).

Tabla 3.1 Caracterización del agrietamiento en El Cacao (Tomado de Alexandre, 2006)

| No. de familia | Buzamiento | Acimut de buzamiento | Abertura (mm) | Espaciamiento (m) | Relleno |
|----------------|------------|----------------------|---------------|-------------------|---------|
| 1              | 83         | 303                  | 1,09          | 0,85              | Arcilla |
| 2              | 78         | 244                  | 1,53          | 1,43              | Arcilla |
| 3              | 09         | 042                  | 0,04          | 0,59              | Arcilla |

### 3.2.2 Propiedades másicas y mecánicas de las rocas

#### Resistencia a la compresión simple

Durante el análisis de las propiedades físico-mecánicas de las rocas que conforman el yacimiento El Cacao se revisó una base de datos de la cual se extrajeron 38 pozos con mediciones de propiedades físico-mecánicas: resistencia a la compresión ( $R_c$ ) y porosidad (Tabla 3.2).

Como se declaró durante la propuesta del procedimiento, la  $R_c$  es la propiedad más importante a considerar durante la clasificación del macizo rocoso en dominios geomecánicos. Por esta razón, se realiza una validación de dicha propiedad, donde son comparados los valores de la base de datos con los rangos de los tipos de rocas que conforman los casos de estudios.

Tabla 3.2 Estadística descriptiva de propiedades físico-mecánicas del yacimiento El Cacao, tomada de 38 pozos (Vincent *et al.*, 1983)

| <b>Estadígrafos</b>    | <b>Rc</b> | <b>Porosidad</b> |
|------------------------|-----------|------------------|
| Media                  | 50,05     | 3,53             |
| Error típico           | 2,48      | 0,21             |
| Mediana                | 49,27     | 3,30             |
| Moda                   | 51,58     | 2,80             |
| Desviación estándar    | 15,30     | 1,30             |
| Varianza de la muestra | 234,26    | 1,69             |
| Curtosis               | 0,82      | 1,18             |
| Mínimo                 | 9,44      | 1,06             |
| Máximo                 | 84,60     | 7                |

Según Winkler (1973), las diferentes variedades de calizas pueden alcanzar valores de Rc próximos a 255 MPa, mientras que otros autores (ISRM, 1978c; CGS, 1985; Marinos y Hoek, 2001) sitúan estas rocas en el intervalo de 50-100 MPa. En el caso de rocas ígneas, ambos grupos de autores indican que estas poseen  $Rc > 100$  MPa (Tabla 3.3).

Los valores de Rc de las calizas del yacimiento El Cacao se distribuyen entre 9 y 85 MPa, ubicándose dentro de los límites de intervalos descritos por los autores de la Tabla 3.3. De esta manera se validan los datos de esta propiedad para ser utilizados posteriormente en la determinación de los dominios geomecánicos y la elección del método de arranque de las rocas.

Tabla 3.3 Rangos de Rc en calizas y rocas ígneas

| <b>Litología</b> | <b>Rc (MPa)<br/>(Winkler, 1973)</b> | <b>Rc (MPa)<br/>(ISRM, 1978c; CGS, 1985;<br/>Marinos &amp; Hoek, 2001)</b> |
|------------------|-------------------------------------|--|
| Calizas          | < 255                               | 50-100   |
| ígneas           | > 100                               | > 100  |

### 3.2.3 Evaluación geomecánica del macizo rocoso

#### Clasificación RMR de Bieniawski (1979)

En el estudio se obtuvieron valores de calidad, que varían entre 7 y 85, para clasificar el macizo con calidad entre muy buena, buena y muy mala (Figura 3.6). Después del análisis de todos los pozos realizados en el yacimiento se determina que las clases muy buenas representan el 48,8%, las buenas el 47,8% y la muy mala el 3,25%, por lo que predomina la clase buena.

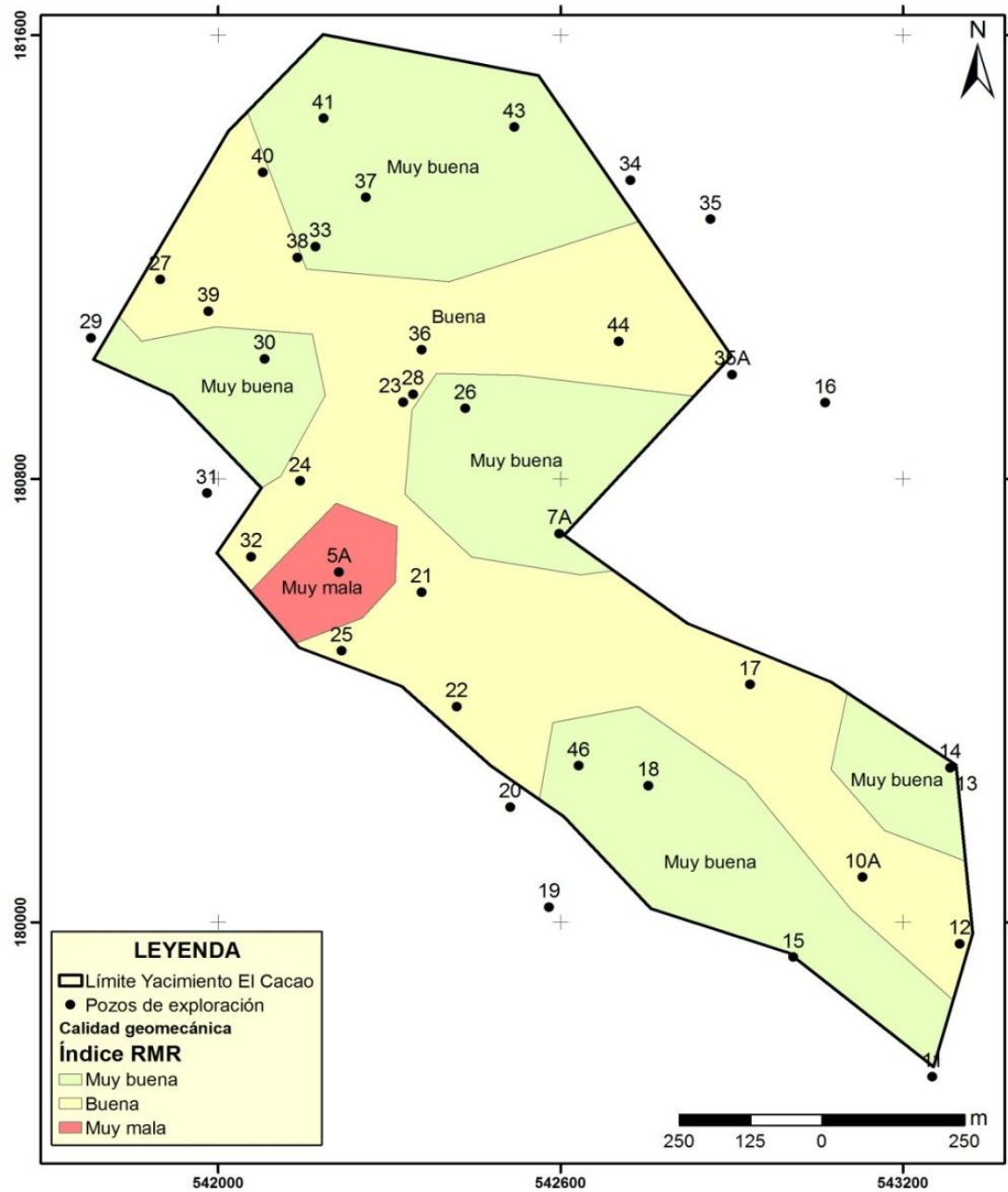


Figura 3.6 Plano de calidad geomecánica del macizo rocoso del yacimiento El Cacao (Tomado de Hernández, 2012).

### 3.2.4 Dominios geomecánicos y método de arranque

El procesamiento de la información geomecánica, así como las características litológicas y la distribución espacial de las discontinuidades permitieron obtener los dominios geomecánicos. Se delimitaron tres dominios cuyas ubicaciones se muestran en la Figura 3.7 y se describen a continuación:

**Dominio Clase I**

Ubicación: Está compuesto por varios dominios ubicados en los límites del yacimiento, bordeando la concesión minera y ocupando un área de 595383,21 m<sup>2</sup>.

Índices geológicos:

1. Tipo de roca: calizas cristalinas muy duras
2. Estructura: estratificación masiva

Índices geomecánicos:

1. Espaciamiento (m): 1,56
2. Tamaño de bloque: grande
3. Resistencia a la compresión (MPa)
  - Índice de carga puntual: 3,2
  - Compresión simple: 64
  - Descripción: resistencia muy alta
4. Calidad geomecánica
  - *RMR*: 85

Descripción: muy buena

**Método de arranque:** voladura.

**Dominio Clase II**

Ocupa un área de 583075,99 m<sup>2</sup>

Índices geológicos:

1. Tipo de roca: calizas, calizas margosas, caliza dura dolomitizada
2. Estructura: agrietada, estratificación masiva a media

Índices geomecánicos:

1. Espaciamiento (m): 0,85
2. Tamaño de bloque: grande

3. Resistencia a la compresión (MPa)

- Índice de carga puntual: 2,17
- Compresión simple: 43,45
- Descripción: resistencia alta

4. Calidad geomecánica:

- *RMR*: 65

Descripción: buena

**Método de arranque:** escarificación muy difícil.

**Dominio Clase III**

Ubicación: al este del yacimiento

Área: 39599,33 m<sup>2</sup>

Índices geológicos:

1. Tipo de roca: calizas margosas blandas, margas
2. Estructura: muy agrietada, estratificación media a fina

Índices geomecánicos:

1. Espaciamiento (m): 0,04
2. Tamaño de bloque: muy pequeño
3. Resistencia a la compresión (MPa)
  - Índice de carga puntual: 0,47
  - Compresión simple: 9,45
  - Descripción: resistencia media a baja
4. Calidad geomecánica
  - *RMR*: 7

Descripción: muy mala

**Método de arranque:** escarificación fácil.

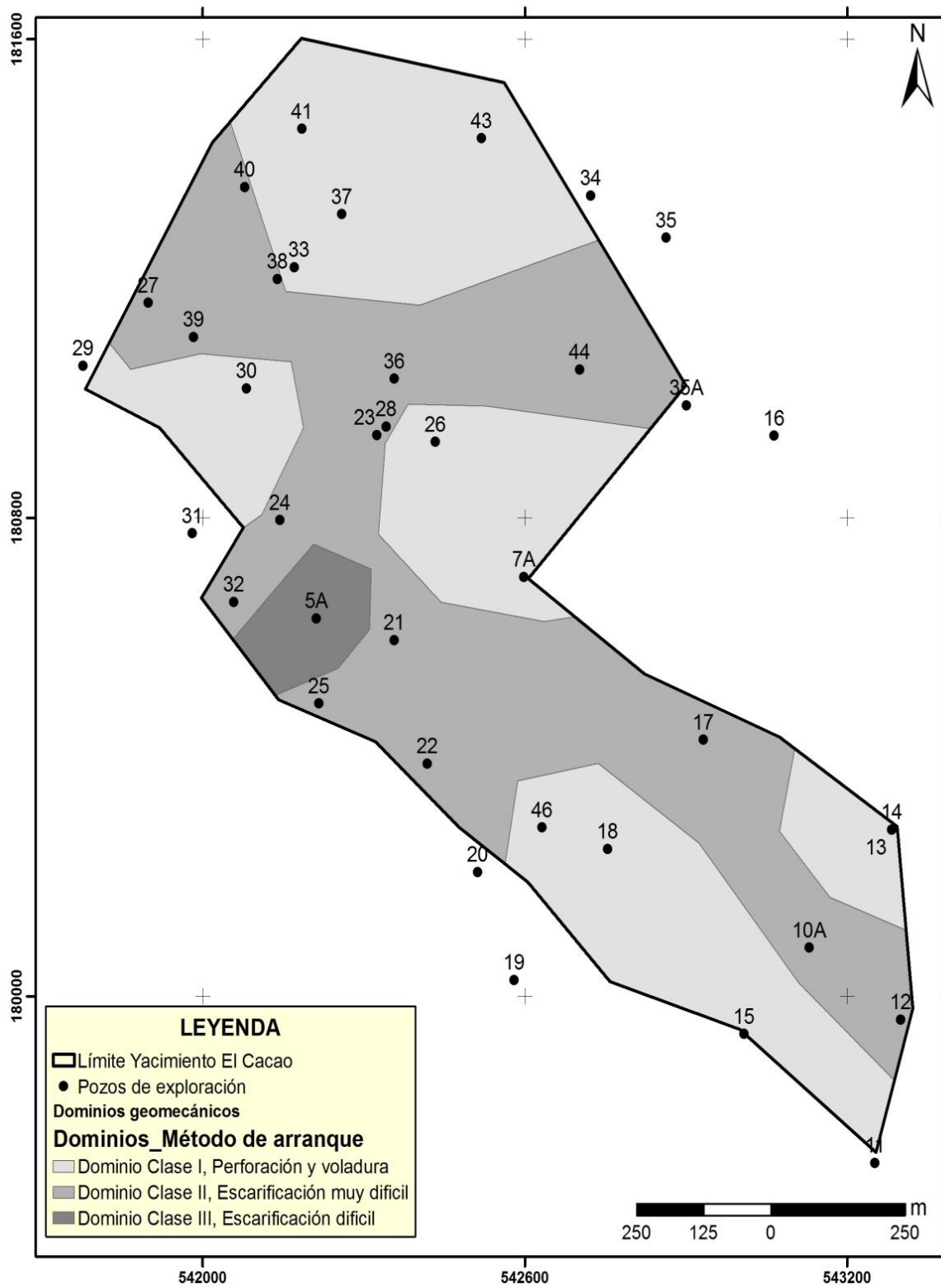


Figura 3.7 Plano de dominios geomecánicos del yacimiento El Cacao (Tomado de Hernández, 2012).

### 3.2.5 Validación del método del procedimiento propuesto

En la cantera El Cacao, el método de arranque de la roca empleado es voladura para todo el yacimiento, sin embargo, la aplicación del diagrama establecido por el procedimiento propuesto en la investigación sugiere, que si bien en el dominio Clase I es apropiado el método de arranque empleado, no ocurre lo mismo en los dominios Clase II y III, donde se puede utilizar el método de arranque mecánico en sus variantes Escarificación muy difícil y fácil respectivamente.

Las causas del requerimiento de diferentes métodos de arranque queda justificado por las diferencias en los índices geológicos, específicamente en el tipo de roca que no es homogénea para todo el yacimiento, pasando desde calizas cristalinas muy duras en el Dominio Clase I hasta calizas margosas blandas y margas en el Dominio Clase III. Esas diferencias condicionan la variación de las propiedades físico mecánicas e incluso del grado de agrietamiento y separación entre grietas para todo el yacimiento.

## 3.3 Segundo caso de estudio: Pilón

### 3.3.1 Características geológicas del yacimiento

El yacimiento Pilón se ubica en el extremo oriental de Cuba. Las coordenadas del centro del yacimiento son: X: 624 600; Y: 221 000; (Figura 3.1), al NE del primer caso de estudio (El Cacao). Desde el punto de vista regional, el yacimiento de calizas Pilón se enmarca en un contexto geológico de poca complejidad, con formaciones geológicas de edades del Oligoceno Superior-Mioceno Inferior parte baja, en contacto con serpentinitas (Figura 3.8).

El yacimiento se encuentra en la Fm. Bitirí y las litologías que lo componen se subdividen en 3 tipos principales diferenciadas por capas: calizas, calizas organógenas y órgano-detriticas. En ocasiones, estas calizas se encuentran en contacto con serpentinitas, las que se describen a continuación:

**Capa 1:** Caliza estratificada de color blanco crema con tonalidades amarillentas. Posee resistencia media, es compacta, de grano fino y en los planos de

estratificación a veces se observa un material arcilloso carbonatado, de color gris verdoso. Constituye la secuencia inferior del corte estratigráfico del yacimiento.

**Capa 2:** Caliza organodetrítica de color blanco crema hasta rosado claro, presenta oquedades cársticas de diferentes dimensiones y grietas rellenas de óxidos de hierro y de calcita. Exhibe una estructura masiva, en gran parte con textura brechosa y de resistencia media; es la variedad más extendida en el yacimiento, que ocasionalmente se presenta recristalizada y marmolizada.

La resistencia a la compresión de las calizas de esta capa disminuye en ocasiones debido a roturas de la muestras por planos de agrietamiento durante el proceso de ensayo.

**Capa 3:** Caliza organógena de color blanco rosáceo con manchas amarillentas, presenta abundantes restos fósiles de corales, conchas de bivalvos, etc. Se observa muy porosa con abundantes oquedades cársticas, generalmente es masiva y de resistencia baja. En algunos intervalos se alterna con una caliza margosa al parecer estratificada.

Las serpentinitas conforman el basamento de la secuencia carbonatada con relaciones tectónicas evidentes entre ellas. Éstas poseen un color verdoso, están agrietadas y muchas veces rellenas de calcita.

En el área de estudio se presentan diversos fenómenos físico-geológicos, tales como:

- Intemperismo: Este fenómeno se encuentra muy extendido, observándose como resultado suelos finos, de colores blancos y rojizos.
- Carso: Su manifestación es extensa, tanto a nivel superficial como subterráneo. Las oquedades cársticas de diferentes dimensiones dan paso a microestructuras de 10,50 a 17,70 m. Además, en varias zonas del yacimiento son visibles cavernas de grandes dimensiones (Figura 3.9).



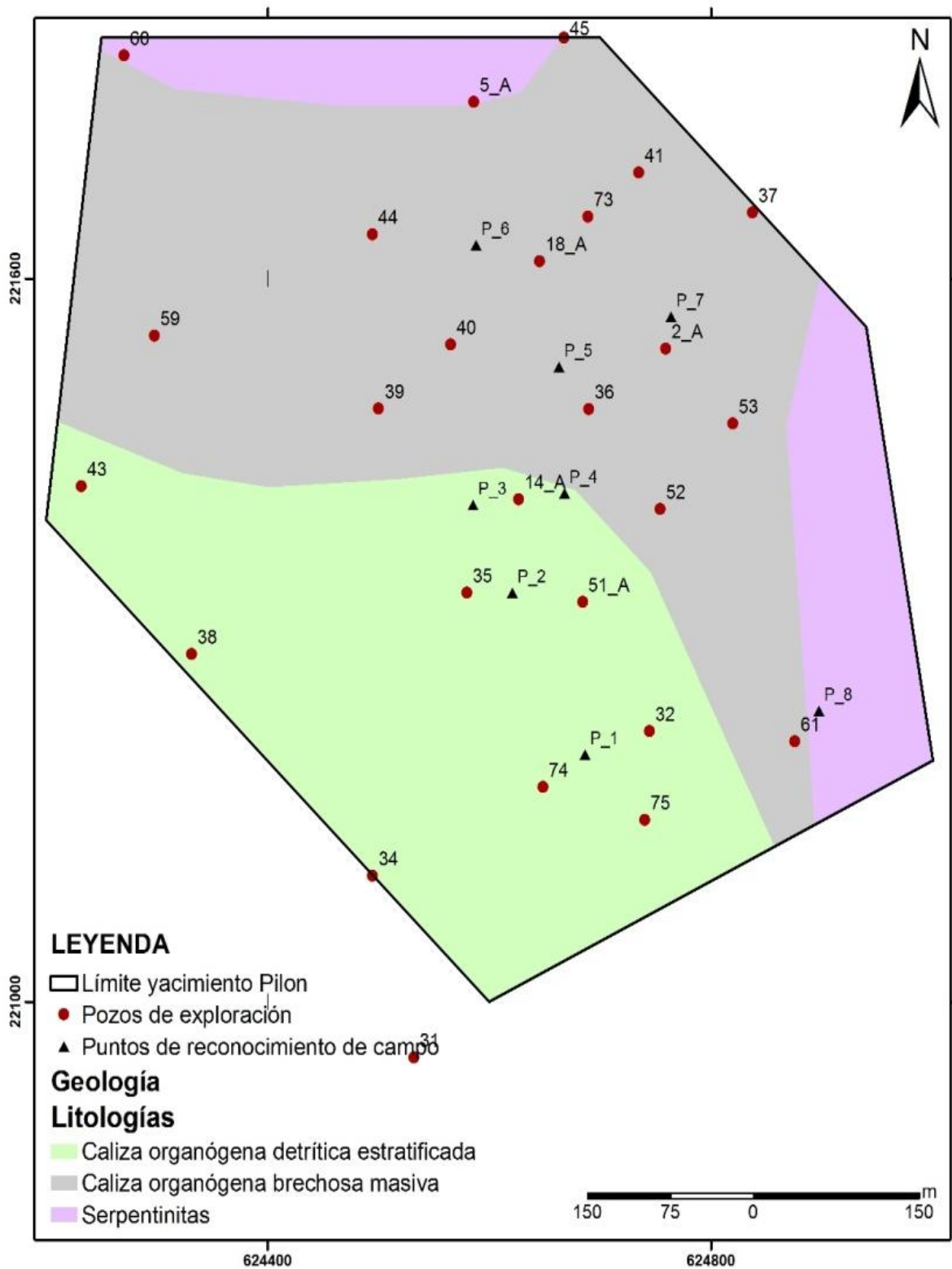


Figura 3.8. Plano geológico del área de estudio, yacimiento Pilón, (Tomado de Hernández, 2014).



Figura 3.9 Cavernas desarrolladas en las calizas del yacimiento Pilón (Hernández, 2014).

### **Tectónica**

Hacia la zona Este y Norte del yacimiento, estas rocas contactan tectónicamente con cuerpos de serpentinitas en los cuales se observan zonas de intensa brechosidad y agrietamiento en ambas litologías (Figura 3.10). Los ángulos de inclinación en los contactos se encuentran próximos a  $30^{\circ}$ .



Figura 3.10. Contacto tectónico entre las calizas de la Fm Bitirí (encima) y las serpentinitas (debajo), ambas fuertemente tectonizadas (Hernández, 2014).

### **Análisis estructural del macizo rocoso**

La revisión y análisis de informes de trabajos previos (Martín *et al.*, 1979) en el yacimiento no reportan mediciones estructurales. Por esta razón se procedió a realizar mediciones estructurales en el yacimiento, al obtener como resultado la

presencia de varias estructuras primarias y secundarias. Las primarias están representadas por los estratos de las rocas carbonatadas con yacencias horizontal o sub-horizontales y un ligero buzamiento hacia el sureste. Los elementos de yacencia tienen un valor de  $118^{\circ}/06^{\circ}$ .

Las estructuras secundarias están representadas por tres familias de grietas (Tabla 3.4) que presentan altos buzamientos superiores a 45 grados, como es el caso de la familia 2 y verticales o sub-verticales, como el caso de las familias 1 y 3 (Figura 3.11). La intercepción de estas familias con las superficies de los estratos le confiere una estructura en bloques al yacimiento, su tamaño está condicionado al espaciamiento de las grietas y la potencia de las capas. En relación con los rumbos de las estructuras, existe un predominio de direcciones norte-sur (Figura 3.12).

Tabla 3.4 Yacencia de estructuras geológicas en el yacimiento Pilón

| Estructura      | Familia de grieta | Buzamiento | Acimut de buzamiento |
|-----------------|-------------------|------------|----------------------|
| <b>Estratos</b> | ...               | 06         | 118                  |
| <b>Grietas</b>  | 1                 | 85         | 068                  |
| <b>Grietas</b>  | 2                 | 59         | 086                  |
| <b>Grietas</b>  | 3                 | 90         | 193                  |

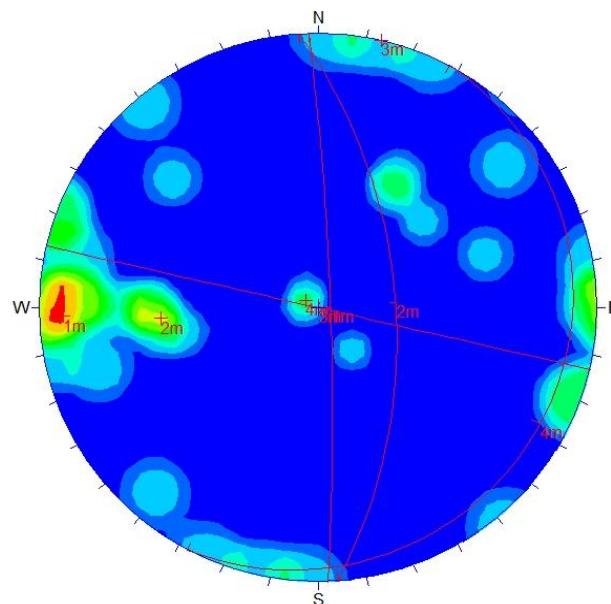


Figura 3.11. Diagrama de contorno y planos del agrietamiento (Hernández, 2014).

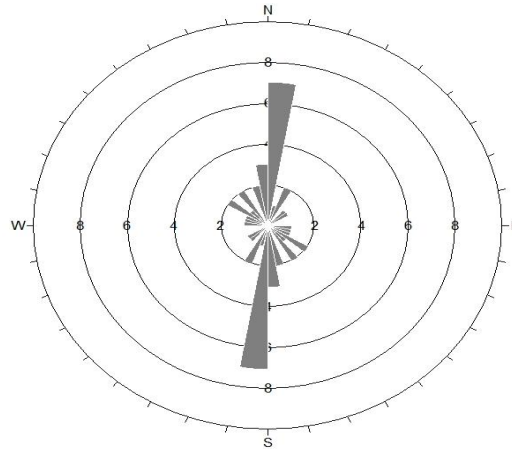


Figura 3.12 Diagrama de rosetas del agrietamiento (Hernández, 2014).

### 3.3.2 Propiedades másicas y mecánicas de las rocas

Las propiedades físico-mecánicas de las rocas fueron tomadas de informes de trabajo previos (Gómez, 2010). La validación de los datos se efectuó para valorar la posible utilización de estas propiedades. La estadística descriptiva de las propiedades, particularmente de la  $R_c$  (Tabla 3.5) muestra que las mismas se encuentran dentro de los rangos permisibles para el tipo de roca analizada (Tabla 3.3).

#### Validación de la base de datos

Tabla 3.5 Estadística descriptiva de propiedades físico-mecánicas del yacimiento Pilón

| Estadísticos           | Porosidad | $R_c$ |
|------------------------|-----------|-------|
| Media                  | 7,82      | 43,55 |
| Error típico           | 0,18      | 1,58  |
| Mediana                | 7,63      | 43,56 |
| Moda                   | 8,60      | 55,5  |
| Desviación estándar    | 0,95      | 8,37  |
| Varianza de la muestra | 0,90      | 70,1  |
| Rango                  | 4,03      | 32,11 |
| Mínimo                 | 5,65      | 27,4  |
| Máximo                 | 9,68      | 59,52 |

#### Resistencia a la compresión simple ( $R_c$ )

La  $R_c$  de las rocas en el yacimiento presenta valores máximos, mínimos y promedios para cada una de las capas, como se ilustra gráficamente en la Figura 3.13.

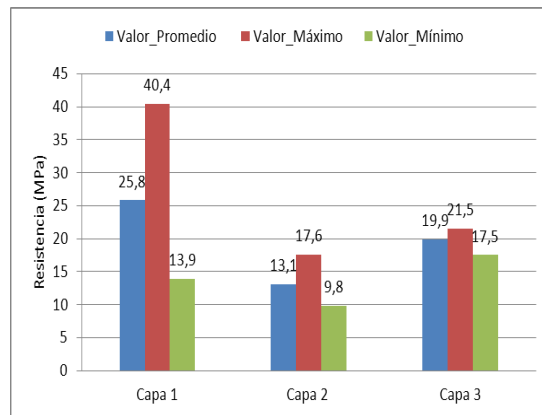


Figura 3.13. Comportamiento de la Rc en el yacimiento Pilón.

La Capa 1 presenta los mayores valores de resistencia (40,4 MPa). Este comportamiento está condicionado por las características inherentes del tipo de roca con estratificación masiva, con capas de potencia superiores a 1 m. La roca manifiesta baja intensidad de agrietamiento con espaciamiento superior a 50 cm, lo que representa un índice de discontinuidad ( $J_v$ ) muy bajo de 4 grietas/m<sup>3</sup> y los menores valores de porosidad por la poca cantidad de discontinuidades primarias (estratos) y secundarias (grietas).

Debido a su estructura, las Capas 2 y 3 poseen menor resistencia, con valores máximos de 17,6 y 21,5 MPa, respectivamente, son rocas con espesores inferiores a 30 cm y afectadas por dislocaciones tectónicas que condicionan bloques pequeños. También se encuentran afectadas por procesos cársticos que condicionan porosidades mayores que en la Capa 1.

### 3.3.3 Índices geomecánicos (*RMR*)

#### Clasificación *RMR* de Bieniawski

Dos valores de calidad se obtuvieron para el yacimiento. De los 24 pozos analizados, 15 reportaron buena calidad en calizas organógenas brechosas, con valores de *RMR* de 66 y los restantes 9 pozos revelaron valores de *RMR* de 37, por lo que las calizas organodetríticas estratificadas califican como de mala calidad geomecánica (Figura 3.14). Este comportamiento se debe, tanto a la variabilidad espacial de la resistencia como a la intensidad del agrietamiento.

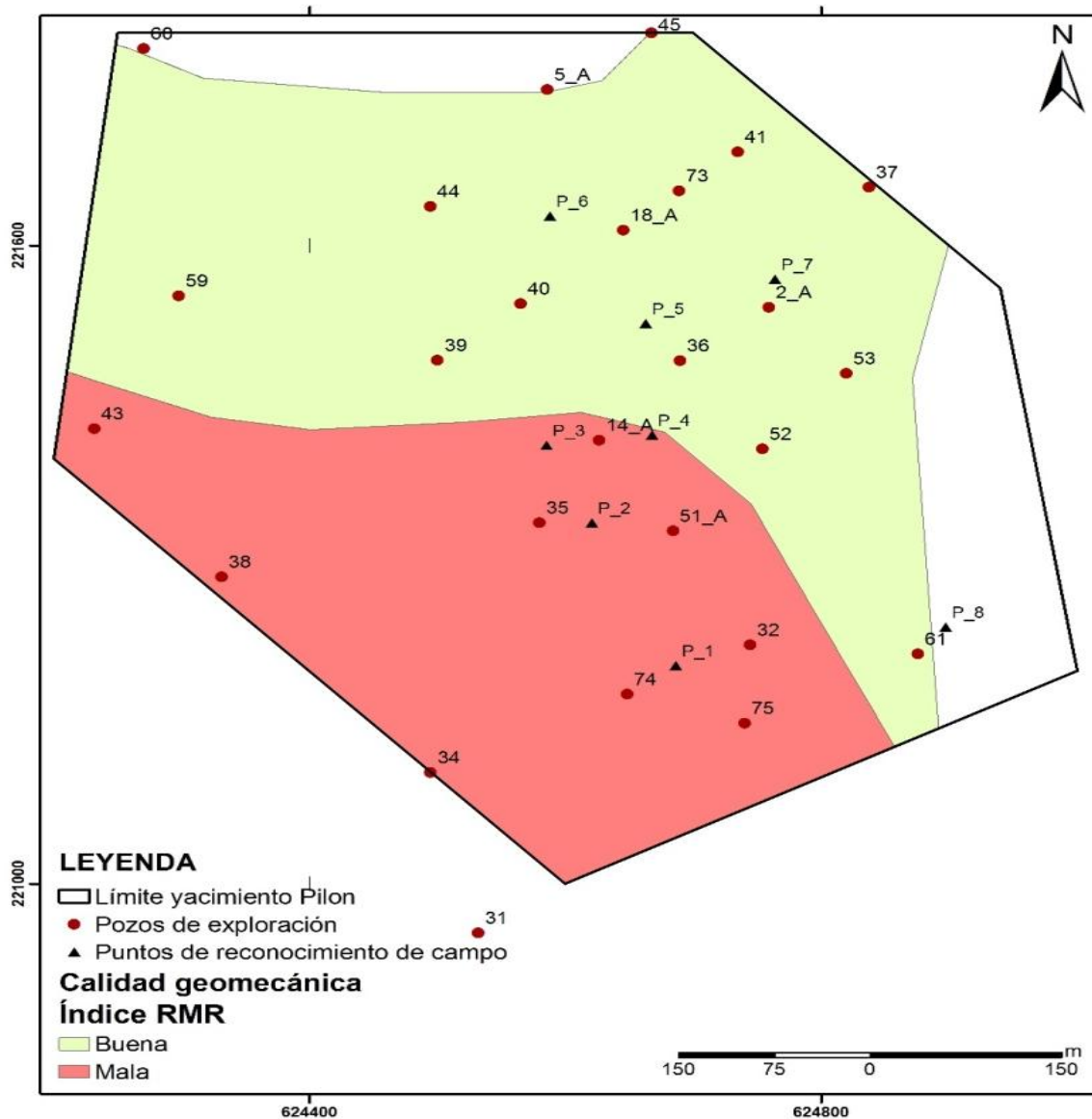


Figura 3.14. Plano de calidad geomecánica del macizo rocoso del yacimiento Pilón (Hernández, 2014).

### 3.3.4 Dominios geomecánicos y método de arranque

El procesamiento de la información geomecánica, así como las características litológicas y la distribución espacial de las discontinuidades permitieron obtener los dominios geomecánicos definidos como sectores o áreas con semejante comportamiento de las características geomecánicas del macizo rocoso. En el yacimiento Pilón se delimitaron dos dominios mostrados en la Figura 3.15 y descritos a continuación:

### **Dominio Clase I**

Ubicación: al norte y este del yacimiento, al ocupar un área de 233 409 m<sup>2</sup>

Índices geológicos:

1. Tipo de roca: calizas cristalinas muy duras
2. Estructura: estratificación masiva

Índices geomecánicos:

1. Espaciamiento (m): 1
2. Tamaño de bloque: grande
3. Resistencia a la compresión (MPa)
  - Índice de carga puntual: 3
  - Compresión simple: 59
  - Descripción: resistencia muy alta
4. Calidad geomecánica
  - *RMR*: 66

Descripción: buena

**Método de arranque:** voladura.

### **Dominio Clase II**

Ubicación: al sur-suroeste del yacimiento y ocupa un área de 167 341 m<sup>2</sup>

Índices geológicos:

1. Tipo de roca: calizas, calizas margosas, caliza dura dolomitizada
2. Estructura: agrietada, estratificación masiva a media

Índices geomecánicos:

1. Espaciamiento (m): 0,30
2. Tamaño de bloque: mediano
3. Resistencia a la compresión (MPa)
  - Índice de carga puntual: 2,3
  - Compresión simple: 45,92
  - Descripción: resistencia alta

4. Calidad geomecánica

- RMR: 37

Descripción: Mala

**Método de arranque:** escarificación difícil.

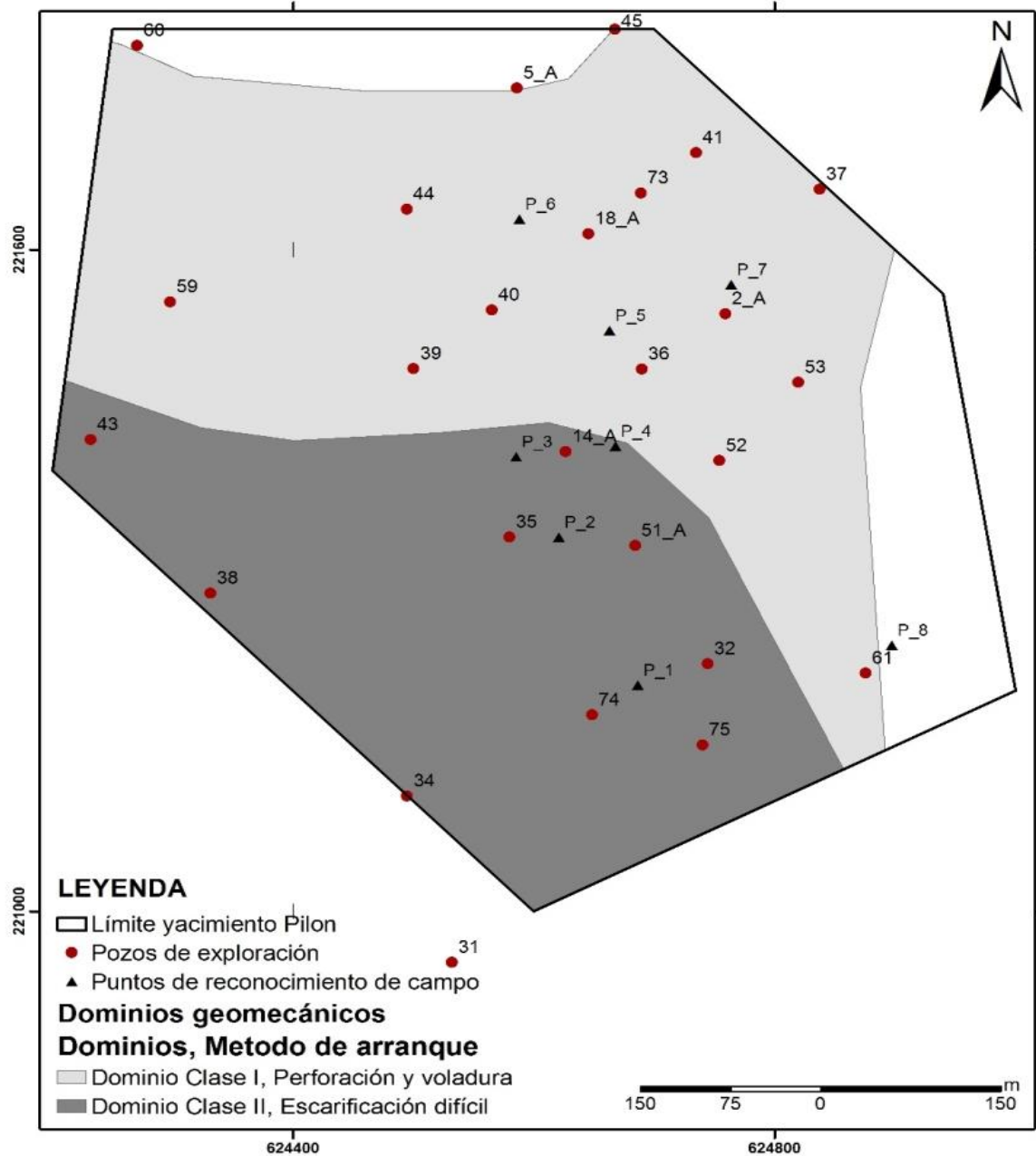


Figura 3.15. Dominios geomecánicos en el yacimiento Pílon (Hernández, 2014).



### **3.3.5 Validación del método del procedimiento propuesto**

Este yacimiento, igual que El Cacao, se explota con el método de arranque voladura. La aplicación del procedimiento propuesto en la presente investigación demostró que en el dominio Clase I resulta viable el método que se emplea mientras que en el dominio Clase II procede el mecánico, con su variante escarificación difícil.

Las causas del cambio del método de arranque entre los dos dominios tiene causas similares a lo explicado en el caso del yacimiento El Cacao, ya que el dominio Clase I está constituido por rocas calizas cristalinas muy duras, con menor intensidad de agrietamiento, espaciamiento entre grietas de un metro, mientras que el dominio Clase II está conformado por calizas margosas y caliza dura dolomitizada con estructura agrietada con una separación de 0,30 m entre grietas, esos índices geológicos determinan el comportamiento geomecánico variable en el macizo.

## **3.4 Tercer caso de estudio: Los Guaos**

### **3.4.1 Características geológicas del yacimiento**

Al Este del primer caso de estudio (El Cacao) (Figura 3.1) se ubica la cantera Los Guaos. En el área donde se ubica el yacimiento afloran las rocas del Grupo El Cobre, representado por diferentes tipos de rocas vulcanógenas y vulcanógeno-sedimentarias. Predominan: tobas, lavas de composición andesítica, andesítica-dacítica y dacítica. Con estas rocas se intercalan tufitas y calizas, además, se asocian con este complejo vulcanógeno - sedimentario cuerpos hipabisales y diques de diversa composición. El yacimiento está formado por un cuerpo sub-volcánico de composición media a ácida, representado por porfirita andesítica-dacítica y dacítica, con forma alargada con dirección NE-SW (Figura 3.16). Las edades de estas rocas se ubican entre Paleoceno- Eoceno Medio parte baja.

## **Tectónica**

Las rocas existentes en la región de Santiago de Cuba forman parte del flanco norte del anticlinorium Sierra Maestra con una yacencia general sub-latitudinal al norte,

aunque en ocasiones puede ser al norte-noreste, noreste, noroeste e incluso puede llegar a ser meridional (Alioshin *et al.*, 1975). Éstas se encuentran afectadas por la tectónica disyuntiva, por tanto la yacencia de la roca es muy perturbada, y los buzamientos abruptos e invertidos en algunas partes. La tectónica genera un alto nivel agrietamiento, cuyas grietas generalmente aparecen rellenas de zeolitas y pátinas de oxidación. El macizo es cortado por varias fallas, una de ellas transversal, con dirección aproximada NE-SO; ésta se puede observar al oeste del río Los Guaos donde aparecen los buzamientos invertidos.

### **Análisis estructural del macizo rocoso**

La revisión de trabajos previos en el yacimiento Los Guaos (García, 1981) reporta la ausencia de estudios estructurales. Por esta razón se llevaron a cabo mediciones de elementos de yacencia, cuyo procesamiento e interpretación reporta que el macizo está afectado por tres familias de grietas (Tabla 3.6), caracterizadas por altos buzamientos superiores a 45 grados, como es el caso de las familias 1 y 3 y verticales o sub-verticales como el caso de la familia 2 (Figura 3.17).

La intercepción de estas familias con la superficie o contorno del cuerpo intrusivo le confiere una estructura en bloques al yacimiento. El tamaño de los bloques está condicionado por el espaciamiento de las grietas. En el yacimiento predominan las estructuras con direcciones norte-sur y noreste (Figura 3.18).

Tabla 3.6. Yacencia de estructuras geológicas en el yacimiento Los Guaos

| <b>Familia de grietas</b> | <b>Buzamiento</b> | <b>Acimut de buzamiento</b> | <b>Abertura (mm)</b> | <b>Espaciamiento (m)</b> |
|---------------------------|-------------------|-----------------------------|----------------------|--------------------------|
| 1                         | 64                | 270                         | 5                    | 1,25                     |
| 2                         | 45                | 323                         | Cerrada              | 1                        |
| 3                         | 73                | 078                         | 17,5                 | 1                        |

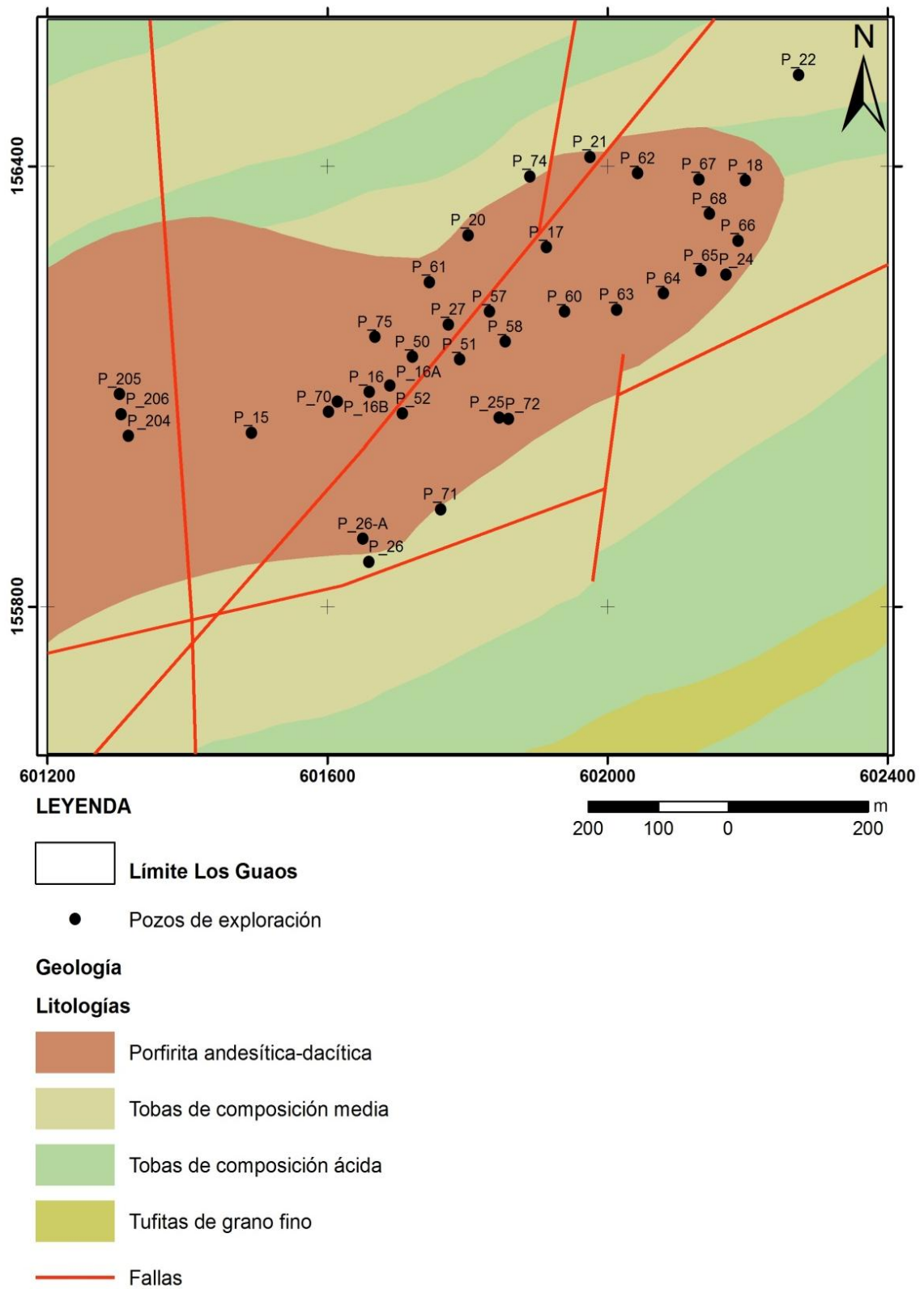


Figura 3.16. Plano geológico del yacimiento Los Guaos (Hernández, 2014).

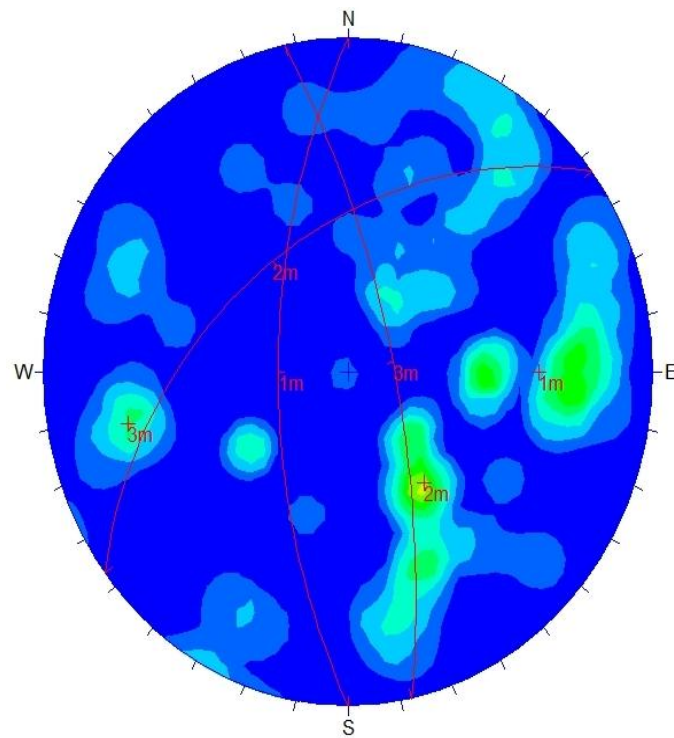


Figura 3.17. Diagrama de contorno y planos del agrietamiento en el yacimiento Los Guaos (Hernández, 2014).

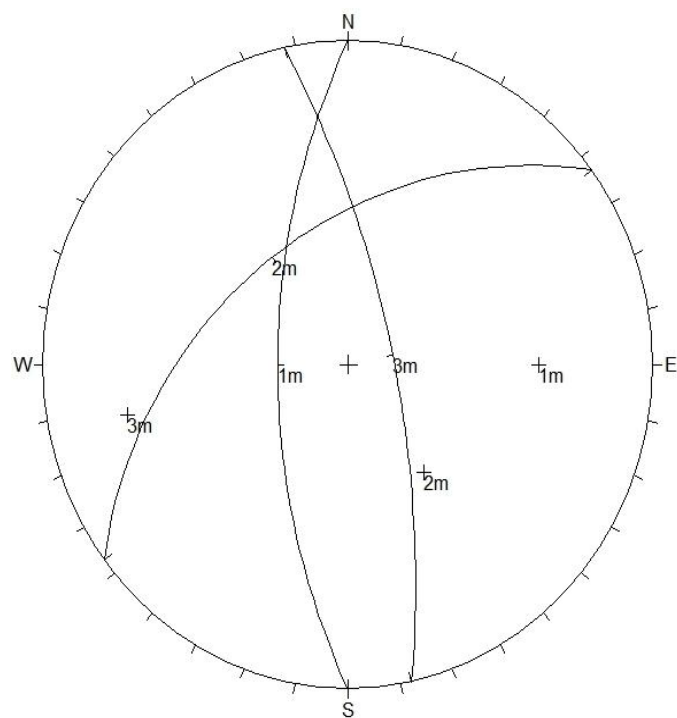


Figura 3.18. Diagrama de rosetas del agrietamiento en el yacimiento Los Guaos (Hernández, 2014).

### 3.4.2 Propiedades másicas y mecánicas de las rocas

De la revisión y análisis de trabajos previos en el yacimiento Los Guaos (García, 1981) se extrajeron propiedades físico-mecánicas, las cuales inicialmente fueron validadas para su posterior utilización en la determinación de los dominios geomecánicos y la elección de los métodos de arranque.

#### Validación de los datos de propiedades físico-mecánicas

Los valores de las propiedades físico-mecánicas, particularmente la  $R_c$  (Tabla 3.7) se encuentran dentro de los rangos permisibles para el tipo de roca que conforma el yacimiento (Tabla 3.3).

Tabla 3.7 Estadística descriptiva de propiedades físico-mecánicas del yacimiento Los Guaos

| Estadígrafos           | Porosidad (%) | $R_c$ (MPa) |
|------------------------|---------------|-------------|
| Media                  | 6,01          | 752,5       |
| Error típico           | 0,62          | 40,31       |
| Mediana                | 5,76          | 685         |
| Desviación estándar    | 3             | 193,3       |
| Varianza de la muestra | 9,04          | 37 382      |
| Mínimo                 | 3,15          | 467         |
| Máximo                 | 17,5          | 1151        |

### 3.4.3 Índices geomecánicos ( $RMR$ )

#### Clasificación $RMR$ de Bieniawski

De los 11 pozos analizados (Figura 3.19), los valores de  $RMR$  son superiores a 68, lo que permite que se califique el yacimiento de buena calidad geomecánica. Este comportamiento se debe al tipo de roca magmática de estructura masiva y cristalina, en el que no se manifiestan procesos de meteorización intensos. La poca variabilidad espacial de la resistencia de la roca se condiciona a las características genéticas del intrusivo, su composición mineralógica y la baja intensidad del agrietamiento.

Este último factor, relacionado con las características tectónicas, influye localmente en una disminución moderada de la resistencia hacia el oeste del yacimiento, al relacionar de manera espacial con una falla de dirección norte-sur que provoca la disminución del espaciamiento de las familias de grietas, el aumento de la porosidad y modificación de las propiedades mecánicas.

#### **3.4.4 Dominios geomecánicos y método de arranque**

El procesamiento de la información geomecánica, así como las características litológicas y la distribución espacial de las discontinuidades permitieron obtener un dominio geomecánico definido como dominio I (Figura 3.20), el cual se describe a continuación:

##### **Dominio Clase I**

Ubicación: ocupa todo el yacimiento, y abarca un área de 402574,67 m<sup>2</sup>

Índices geológicos:

1. Tipo de roca: ígnea efusiva
2. Estructura: masiva

Índices geomecánicos:

1. Espaciamiento (m): 1,12
2. Tamaño de bloque: grande
3. Resistencia a la compresión (MPa)
  - Índice de carga puntual: 37,6
  - Compresión simple: 752
  - Descripción: resistencia muy alta
4. Calidad geomecánica
  - *RMR*: 95

Descripción: muy buena

**Método de arranque:** voladura.

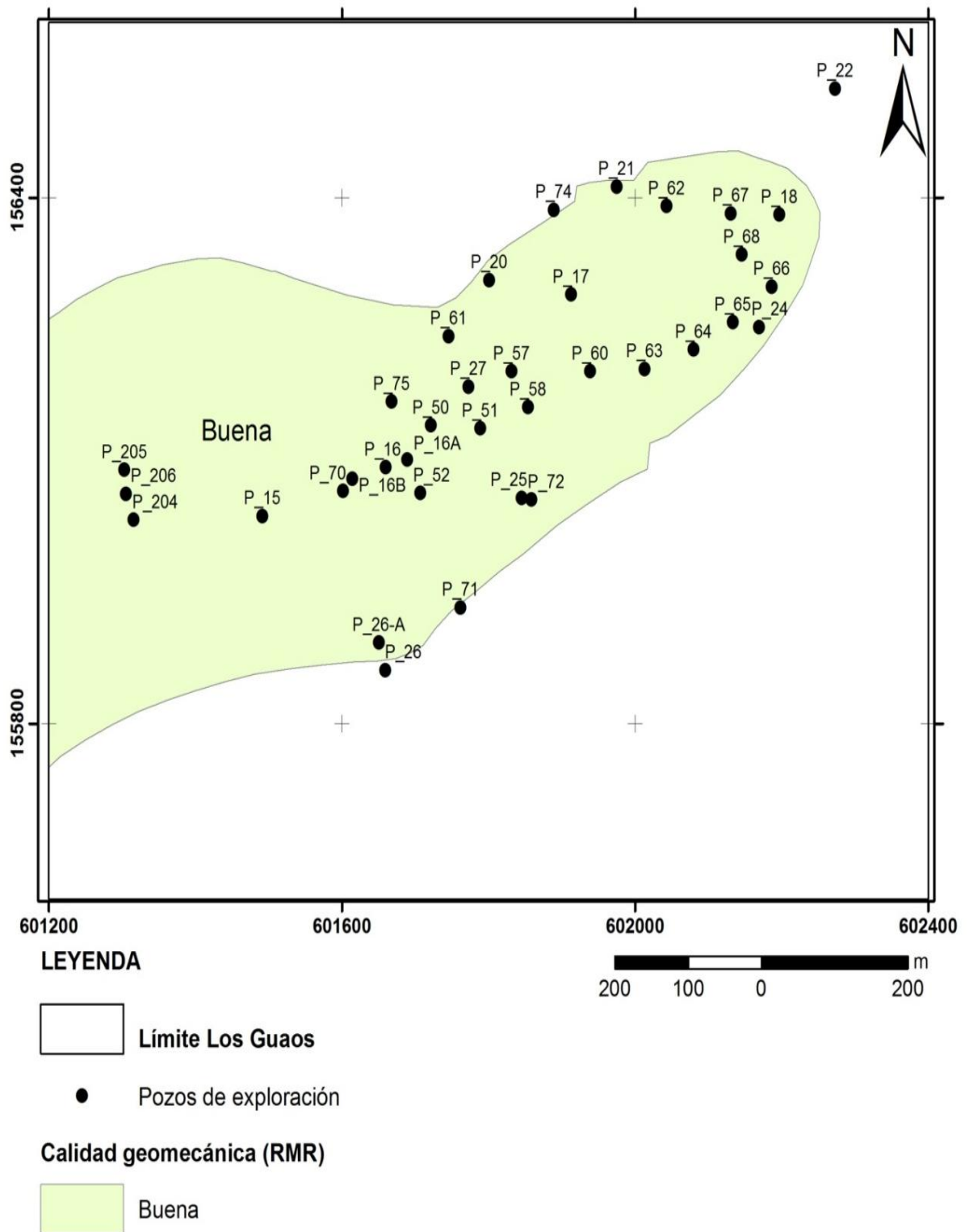


Figura 3.19. Plano de calidad geomecánica de macizo del yacimiento Los Guaos (Hernández, 2014).

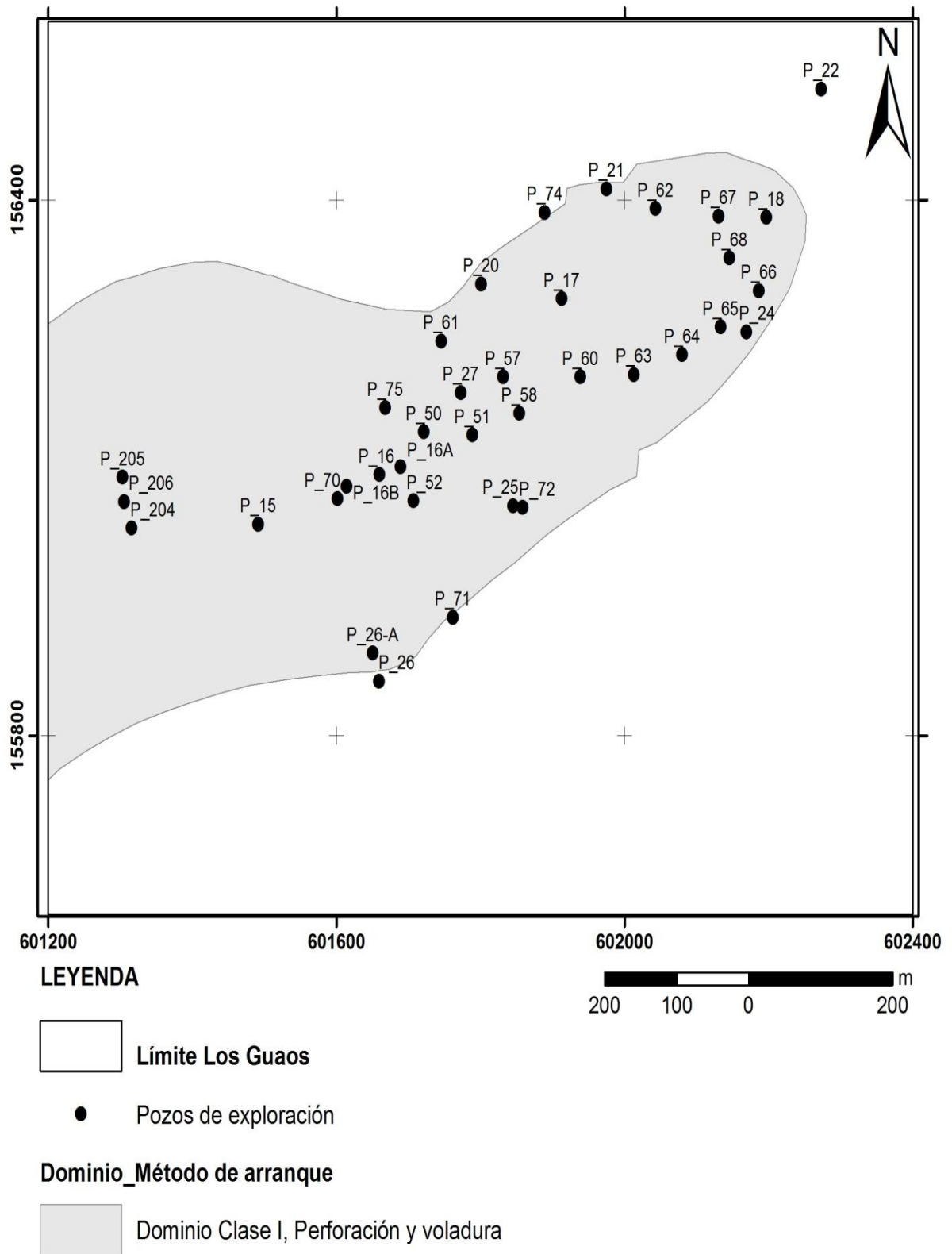


Figura 3.20. Dominio geomecánico del yacimiento Los Guaos (Hernández, 2014).



### **3.4.5 Validación del método del procedimiento propuesto**

Este yacimiento, igual que los anteriores, se explota con el método de arranque voladura, con el cual se obtienen buenos resultados. En el procedimiento propuesto, aplicado en el único dominio que lo conforma, Clase I, constata que el arranque con voladura es el método correcto y factible de aplicación.

### **3.5 Conclusiones**

La aplicación del procedimiento propuesto en la presente investigación para los yacimientos seleccionados como casos de estudio permite concluir que:

- En la actualidad aún es deficiente la selección del método de arranque en los yacimientos para áridos.
- La selección a través de la aplicación del diagrama mediante el cual se ejecuta el procedimiento permite analizar todas las variables que inciden en la eficiencia del arranque.
- El establecimiento de los dominios geólogo-geomecánicos en las canteras para áridos facilita la selección del método idóneo de arranque, al establecer unidades de mayor homogeneidad en sus propiedades físico mecánicas.
- En los casos estudiados se estableció que en 3 dominios el método que se emplea es el mismo que se establece a través del procedimiento propuesto, mientras que en los otros 3 dominios el arranque sería más eficiente con el uso de la variante propuesta, según concluye el diagrama aplicado.

Actualmente en el yacimiento El Cacao se inició la aplicación del método de arranque propuesto, según los resultados de aplicación del actual procedimiento.

## CONCLUSIONES

1. A partir del análisis de los procedimientos existentes en la actualidad y sobre la selección del método de arranque en la explotación a cielo abierto de áridos y con la ayuda del criterio de expertos se identificaron los índices geológicos y geomecánicos que determinan el sistema idóneo de excavabilidad del macizo rocoso. Dentro de los índices geológicos se encuentran los relacionados con tipo de roca, características texturales y estructura geológica y dentro de los geomecánicos se incluyen las propiedades máxicas y mecánicas de las rocas y la calidad del macizo.
2. Las variaciones en los índices geológicos y geomecánicos permiten la división de los macizos rocosos en sectores, bloques o cuerpos llamados dominios geomecánicos que fundamentan, a diferencia de las metodologías propuestas por otros autores, la elaboración del procedimiento para elegir el método de arranque de las rocas.
3. La integración de los índices geológicos y geomecánicos, así como el establecimiento de los dominios geomecánicos para la selección del método de arranque se realiza a través del diagrama desarrollado en la presente investigación que consta de 5 pasos: análisis de las características geológicas, propiedades físico-mecánicas, evaluación geomecánica del macizo rocoso, determinación de los dominios geomecánicos y elección del método de arranque. De esta forma queda establecido el procedimiento para la elección del método de arranque de las rocas en canteras para áridos.
4. La aplicación del procedimiento en los tres casos de estudio seleccionados con diferentes condiciones geológicas y geomecánicas, permitió determinar que en tres dominios existe coincidencia del método de voladura aplicado y el obtenido a través del diagrama, mientras que en otros 3 dominios se demostró que el arranque por métodos mecánicos, recomendado por el procedimiento, resulta más eficiente.

## **RECOMENDACIONES**

- Generalizar la aplicación del procedimiento propuesto para la selección de los métodos de arranque en canteras para áridos en Cuba.
- Automatizar el procedimiento propuesto, a partir de su diagrama.
- Desarrollar investigaciones que permitan valorar la posibilidad de establecer procedimientos similares en otros tipos de yacimientos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abdullatif, O. M, Cruden, D.M. 1983: The relationship between rock mass quality & ease of excavation. *Bull Engineering Geology Environ* 28:183–187.
2. Aduvire, O.; López, J.C. & Llopis, G. 1992: *Arranque y ripado de macizos rocosos*, INGEOPRES. 2, pp.32-40.
3. Alexandre, P. 2006: Metodología para el diseño de las voladuras en canteras de áridos. Tesis Doctoral, Instituto Superior Minero Metalúrgico.
4. Alioshin, V.; Sánchez, F. 1975: Informe de los resultados del levantamiento geológico y búsqueda a escala 1:100 000 en la parte nororiental del a Sierra Maestra. Archivo CNFG.
5. Alfaro, J. 2003: "Materiales utilizados como áridos", [Consultado. 03 marzo 2010] Disponible en: <http://www.slideshare.net>.
6. Amin, M. Huei, M., Hamid, Z. A. & Ghani, M. K. 2009: Rippability assessment of rock based on specific energy & production rate. 2<sup>nd</sup> Construction Industry Research Achievement International Conference (CIRAIC 2009), 9.
7. Astiparraga, E. 1999: El Método Delphi. Universidad de Deusto. Manual. Pág. 1-14.
8. Atkinson, T. 1977: *Selection of Open Pit Excavating & Loading Equipment*, Transaction Institute of Mining & Metallurgy – Section A, pp. A101 – A129.
9. Barton, N.; Lien. R. & Lunde, J. 1974: *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Norwegian Geotechnical Institute Publication 106, pp. 4-15.
10. Basarir, H. 2006: *Engineering geological studies and tunnel support design at Sulakyurt dam site, Turkey*. *Engineering Geology* 86, pp. 225-237. (Also mentions: Phase<sup>2</sup> & RocLab).
11. Basarir, H. & Karpuz. C. 2004: *Rippability Classification System for Marls in Lignite mines*, *Journal of Engineering Geology* Vol. 74, Issues 3-4, pp. 303-318.

12. Basarir H.; Karpuz C. & Tutluoglu L. 2007: "*A fuzzy logic based rippability classification system*". Template journal.
13. Basarir H.; Karpuz C. & Tutluoglu L. 2008: "*Specific energy based rippability classification system for coal measure rock*", Journal of terramechanics.
14. Bell, F. G. 2004: *Engineering geology & construction*. Taylor and Francis Group, London, pp. 791.
15. Burrough, P. A. 1986: *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford, Oxford Science.
16. Burrough, P. A. 1988: "*Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*". Oxford, Oxford University press. pp. 194.
17. Bieniawski, Z. T. 1973: *Engineering classification of jointed rock masses*. Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs 15, pp.335-344.
18. Bieniawski, Z.T. 1974: *Geomechanics classification of rock masses and its application in tunnelling*. Third Int, Congress on Rock Mechanics, ISRM, Denver, HA, pp. 27-32.
19. Bieniawski, Z.T. 1976: *Rock mass classification in rock engineering*. In *Exploration for rock engineering*, proc. of the symp, eds. Z.T. Bieniawski Cape Town: Balkema, pp. 97-106.
20. Bieniawski, Z.T. 1979: *Tunnel design by rock mass classifications*, Tech. Rep. GL-799-19. U.S. Corp of Eng. WES Vicksburg MS, pp. 128-130.
21. Bozdog, T. 1988: *Indirect rippability assessment of coal measure rocks: Ankara, Turkey*, METU: 86.
22. Cardentey, M. 2010: Estado "del arte" en las producciones de áridos en Cuba y propuesta de método para implantar sistemas de calidad en estos procesos, Primeras Jornadas Iberoamericanas sobre "Caracterización y Normalización de Materiales de Construcción". Programa CYTED. Madrid, pp. 20.
23. Castro M, & Lizasoain L. 2012: *Las técnicas de modelización estadística en la investigación educativa: Minería de datos, modelos de ecuaciones*

- estructurales y modelos jerárquicos lineales. Rev. Esp. Pedagog. Revista Espanola de Pedagogia, 70 (251), 131-148.
24. CATERPILLAR. 2001: Caterpillar Performance Handbook, Edition (38<sup>th</sup> ed). CAT publication, Caterpillar Inc. Illinois, USA.
25. CATERPILLAR. 2004: Caterpillar Performance Handbook, Edition (35<sup>th</sup> ed). CAT publication, Caterpillar Inc. Illinois, USA.
26. CATERPILLAR. 2006: Caterpillar Performance Handbook, Edition (36<sup>th</sup> ed). CAT publication, Caterpillar Inc. Illinois, USA.
27. Canadian Geotechnical Society. 1985: Canadian Foundation Engineering Manual. Part 2, 2<sup>nd</sup> ed), CGS, Vancouver, Canada.
28. Church, H.K. 1981: Excavation handbook. McGraw-Hill Inc., New York
29. Deere, D.U. & Miller, R.P. 1966: Engineering classification and index properties for intact rock. Technical Report No AFNL-TR-65-116. Albuquerque, NM.
30. Deere, D.U.; Hendron, A.J.; Patton, F.D. & Cording, E.J. 1967: *Design of surface and near surface construction in rock*, Proceedings of the 8<sup>th</sup> Symposium on Rock Mechanics, American Institute of Mining, Metallurgy, & Petroleum Engineering, Minneapolis, Minnesota, pp.237-302.
31. Deschappells, R., 2009: *La industria local de materiales de construcción, una solución para la vivienda*. [Consultado. 20 junio 2011]. Disponible en: <http://www.juventudrebelde.cu/cuba/2009-03-0>.
32. Duncan, N. 1969: *Engineering Geology and Rock Mechanics*. Vol. 1, Leonard Hill, London.
33. Eastman, J. R. 2006: The IDRISI Andes Tutorial. IDRISI Production, 1987-2006, Clark University. pp. 284.
34. Franklin, J. A., Broch E. & Walton. G. 1971: *Logging the mechanical character of rock*. Transactions of the Institution Mining and metallurgy, Sec. A.: Mining industry 80, pp. A1-9.

35. Franklin, J. A. 1977: *The monitoring of structures in rock*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts Volume 14, Issue 4, Pages 163–192.
36. Franklin, J. A. & Dusseaul, M.B. 1989: *Rock Engineering*. Ed. McGraw-Hill.
37. García, J. R. 1981: Exploración Adicional del Yacimiento de Porfiritas “Los Guaos”. MIMC. Centro Minero Geológico y de Proyectos. Brigada Geológica de Oriente.
38. Gehring, K. H. 1992: Evaluation of Cutting Performance for VASM. Internal Report BBV, 08-04.
39. GeoChalkboard. 2012: Integrating ArcGIS and Google Earth for Crime Analysis. Recuperado: 3 de abril de 2013, a partir de <http://www.geospatialtraining.com/blog/index.php/integrating-arcgis-and-google-earth-for-crime-analysis>.
40. Ghose A. K. 2008: *New Technology for Surface Mining in the 21st Century – Emerging Role for Surface*. Miner, Journal of Mines Metals and Fuels, Vol. 56 No. 3 & 4, March – April, pp. 41 – 43.
41. Gómez, R. I. 2010: *Actualización de los materiales de construcción para presa Mayarí*. Cantera Pílon. ENIA.
42. Gómez, M. & Barredo, J.I. 2005: *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid, Ra-Ma Editorial. 2ª edición.
43. Gómez, M.I. & Barredo, J.I. 2006: *Sistema de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenacion del territorio*. Ed. 2, ilustrada. Alfaomega Grupo Editor, ISBN. 9701511549, 9789701511541. pp. 279.
44. Goran, B., Rolf, C. & Leif, L. 2004: *Choice of rock excavation methods for the Swedish deep repository for spent nuclear fuel: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company*, Stockholm, Sweden. Retrieved on 28<sup>th</sup> March, 2011 from: [www.skb.se](http://www.skb.se), pp. 146.

45. Gurocak, Z., Alemdag, S. & Zaman, M.M. 2008: Rock slope stability and excavatability assessment of rocks at the Kapikaya dam site, Turkey: *Journal of Engineering Geology*, vol. 96(1–2): pp. 17–27.
46. Hadjigeorgiou, J. & Scoble, 1988: *Ground characterization for assessment of ease of excavation*. Mine Planning & Equipment Selection, eds., Singhal y Vavra, Proceedings of the 4<sup>nd</sup> ed., International Symposium 011, Calgary. Balkema, Rotterdam, pp. 323 – 331.
47. Hadjigeorgiou, J. & Scoble, M.J. 1990: *Ground characterization for assessment of ease of excavation*. In: Singhal, R.K., Vavra, M. (Eds.), Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Calgary, AB. Balkema, Rotterdam, pp. 323–331.
48. Hadjigeorgiou J, & Poulin R. 1998: *Assessment of ease of excavation of surface mines*. *J Terramech*, pp. 137–153,35.
49. *Handbook of Ripping Twelfth. 2000, edition. Caterpillar INC.*
50. Hakan, B. 2004: *A rippability classification system for marls in lignite mines*. *Journal of Engineering Geology*, 74 (3-4); 303-318.
51. Henríquez R., C., & Quense A., J. 2009: Evaluación Multicriterio/Multiobjetivo aplicada a los usos y coberturas de suelo en la cuenca de Chillán. Presentado en IV Encuentro de la Red Iberoamericana de la Evaluación y Decisión Multicriterio, Guadalajara, México. Recuperado a partir de <http://www.ubiobio.cl/miweb/webfile/media/222/Espacio/2010/EVALUACI%C3%93N%20MULTICRITERIO.pdf>
52. Hernández, N.; Almaguer, Y.; Ferrer, Y.; Otaño, J. 2014: Arbol de excavabilidad para elegir el método de arranque en canteras de áridos de la construcción: yacimiento El Cacao. *Minería y Geología*, 30(3): 67 - 84. Consultado: 25 de agosto de 2014. Disponible en: [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg).
53. Hindalco Industries Limited. 2011: “Annual Mines Safety Fortnight”.



54. Hoek, E. & Brown, E.T. 1997: *Practical estimates of rock mass strength*. International Journal Rock Mechanics Mining Science, 34, pp.1165–1186.
55. Hoek, E. & A. Karzulovic, 2000: *Rock mass properties for surface mines. Slope Stability in Surface Mining*, Hustralid WA, McCarter MK, van Zyl DJA (eds) Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgical and Exploration (SME), pp. 59–70.
56. Hoek, E. 2006: *Practical Rock Engineering*: Evert Hoek consulting Inc., North Vancouver, B.C., Canada. Retrieved on 27<sup>th</sup>. February, 2010 [Consultado. 11 febrero 2014]. Disponible en: <http://www.rocscience.com>.
57. International Society for Rock Mechanics. 1978: *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. (ISRM), Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.15, 319-368.
58. Iturralde, Vincent. 1996 : *Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba*. IGPC Project 364. Special Contribution n.1.
59. Jamaluddin, T. A. & S. Mogana. 2000: *Excavatability assessment of weathered rock mass-Case study from Ijok, Selangor & Kemaman, Terengganu*. Warta Geologic. Vol. 26. No. 3, pp. 93-94.
60. Jamaluddin, T. A. & Yusuf, I. 2003: *Influence of discontinuity on overbreaks and underbreaks in rock excavation- Case study from Beris Dam, Kedah, Malaysia*: Geological Society of Malaysia.v. Bulletin 46, pp. 75-85.
61. Jenks, G. F. 1967: "The Data Model Concept in Statistical Mapping", International Yearbook of Cartography 7: pp.186–190.
62. Jimeno, C. L.; E. L. Jimeno; F. A. Carcedo & Llera, J. P. 2000: *Manual de perforación y voladuras de rocas*. Instituto Tecnológico Geominero de España. Serie: tecnología y seguridad minera, Madrid.
63. Karpuz, C. 1990: *Classification System for Excavation of Surface Coal Measures*, Mining Science & Technology 11, pp. 157 – 163.

64. Kentli B. & Topal, F.T. 2004: *Evaluation of rock excavatability and slope stability along a segment of motorway, Pozanti, Turkey*. Journal of Environmental Geology, vol. 46: pp. 83–95.
65. Kirsten, H. 1982: *Classification system for excavation in natural materials*, The Civil Engineer in South Africa 24, pp. 293-308.
66. Kramadibrata, S. 1998: *Assessment on the Performance of Pontinous Surface Miners*, Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection: Canada, pp. 551-556.
67. Legrá, A. 2012: *Aplicación Informática para aplicar el Método de Expertos Delphi*. Manual de Ayuda. Versión 1.0; Diciembre del 2012.
68. Legrá, A. 2006: *Conceptos y reflexiones acerca de la Metodología de la Investigación*. Folleto Digital. Maestría de Minería.
69. Lilly, P.A. 1986: *An Empirical Method of Assessing Rock Mass Blastability*, Davidson eds. Large Open Pit Mining Conference, Ausimm, Victoria, pp. 89-92.
70. Lilly, P.A. 1992: *Estimates of rock joint shear strength in part of the Fimiston open pit operation in Western Australia*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 40, 929-937.
71. Louis, C.A. 1974 : *Rock hydraulics*. *Rock Mechanics*, Ed: L. Muller, Springer Verlag, Viena, pp. 299-382.
72. Marinos, P. & Hoek, E. 2001: *Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch*. Bull Eng Geol Environ (IAEG), 60:85–92.
73. Martín, A.R.; Vinent, F. J.; Cruzata, I. C. & Miralles, M. 1979: *Exploración Adicional del Yacimiento “Calizas Pilón”*. MIMC. Centro Minero Geológico y de Proyectos. Brigada Geológica de Oriente.
74. Minty & Kerans. 1983: *Rock mass Workability, Collected Case Studies*, Engineering Geology, Hydrogeology and Environmental Geology, eds Knight, Special Publication Geological Society of Australia, No 11, pp. 59- 81.

75. Miller, R.; John, E.; Freun & Richard Jonson. 2005: *Probabilidad y Estadística para Ingeniero*. Editorial Félix Varela. La Habana Cuba.
76. Mishra G.B. 2007: "Surface mining", Bhubaneswar; Geominetech publications, first edition, chapter 8-"excavation and loading", page- 405-406.
77. Mohd, F., Mohd. A. & Edy, T. M. 2003: *Excavatability of Hard Materials in ILP, Mersing*: Johor Bahru. Internal Report Universiti Teknologi Malaysia, Unpublished.
78. Mohd, F., Mohd. A., Chan S., Huei., Zuhairi A., Hamid & Mohd K. G. 2009: "Rippability Assessment of Rock Based on Specific Energy and Production Rate". [Consultado. 9 junio 2012]. Disponible en: <http://www.civil.utm.my/staff/file/116/file/Rippability%20Assessment%20of%20ROck%20Based%20on%20Specific%20Energy%20&%20Production%20Rate.pdf>.
79. Murrar, R. S, 1977: *Teoría y Problemas de Probabilidad y Estadística*. Ediciones McGraw-Hill de México. S. A. de C. V.
80. Noa, M. R. 2003: *Indicaciones metodológicas para la elección del método de arranque de las rocas durante el laboreo de excavaciones subterráneas horizontales de pequeña y mediana sección en Cuba oriental*. Tesis Doctoral, Instituto Superior Minero Metalúrgico.
81. Orán, C., Gómez, M., & Bosque, J. 2010: "Una propuesta complementaria de análisis de sensibilidad de un modelo basado en técnicas SIG y evaluación multicriterio". (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. pp. 971-987.
82. Osman, A. 2010: *Geomechanical properties and rockmass quality of the carbonates rus formation, Dammam Dome, Saudi Arabia*: *Arabian Journal for Science & Engineering*, Volume 35, Number 2A. pp. 173-197.
83. Ovejero, R. 1987: *Laboreo de Canteras y Graveras de Áridos: arranque directo y carga*. España.

84. Oficina Nacional de Normalización (ONN). 2004: NC: 177: 02. Áridos. Determinación del porcentaje de huecos. Método de ensayo. La Habana.
85. Oficina Nacional de Normalización (ONN). 2004: NC: 181: 02. Áridos. Determinación del peso volumétrico. Método de ensayo. La Habana.
86. Oficina Nacional de Normalización (ONN). 2004: NC: 54-32: 85. Materiales y productos de la construcción. roca natural. determinación de la resistencia a la compresión La Habana.
87. Oficina Nacional de Normalización (ONN). 2004: NC: 21:99. Geotecnia. Determinación del índice de resistencia a la carga puntual. La Habana.
88. PARTIDO COMUNISTA DE CUBA. 2011: "Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución ", VI Congreso del Partido Comunista de Cuba, pp. 39
89. Peñate, J.L. 2007: *Caracterización de la industria extractiva de materiales de construcción en la provincia de Villa Clara*. Segunda Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias´2007 [CD-ROM]. La Habana.
90. Pettifer, G.S. & Fookes, P. G. 1994: *A Revision of the Graphical Method for Assessing the Excavatability of Rock*, Quarterly Journal of Engineering Geology 27, pp. 145 – 164.
91. Plata, W., Gómez, M. 2010: "*Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid aplicando métodos de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica*". Geofocus 10, pp. 103-134.
92. Ramulu, M.; Choudhury P.B.; Sangode A.G. & Soni A.K. 2012: "*Rippability assessment by refraction seismic survey at an iron ore mine in Karnataka*", Mining engineers Journal, volume 13, No.10, PP-20-27.
93. Rocscience Inc. 2008: Phase2 Version 7.001 - *Finite Element Analysis for Excavations & Slopes*. (www.rocscience.com), Toronto, Ontario, Canada.

94. Romana, M. 1981: *New adjustment rating for application of the Bieniawski classification to slopes*, Proc. Int. Symp. Rock Mechanics Mining Civ. Works. ISRM, Zacatecas, Mexico, pp. 59-63.
95. Romana, M. 1994: *Clasificación de macizos rocosos para la excavación mecánica de túneles*, Revista INGEPRES 18, Abril.
96. Roxborough, F.F. 1987: *Cutting Rocks with Picks*, The Mining Engineer, pp.445-455.
97. Rucker, M.L. 1999: *A rippability index approach for characterizing weathered granites*. Proceedings of the 37<sup>th</sup> U.S. Rock Mechanics Symposium. Colorado. pp. 101-107.
98. Saaty, T.L. 2008: "Decision making with the analytic hierarchy process", Int. J. Services Sciences, Vol. 1, No. 1, pp.83–98.
99. Sahu, R. K. 2012: *Application of ripper-dozer combination in surface mines: its applicability & performance study* (Doctoral dissertation). [Consultado.28 agosto 2013]. Disponible en: <http://www.saimm.co.za/Journal/v107n12p817.pdf>.
100. Saliu, M. A. & Shehu, S. A. 2014: *Assessment of Excavation Method of Obajana & Ewekoro Limestone Deposits*. Earth Science. Vol. 3, No. 2, pp. 42-49. doi: 10.11648/j.earth.20140302.12. [Consultado.24 noviembre 2014]. Disponible en: <http://www.sciencepublishinggroup.com/j/earth>.
101. Santillán, R. V. 2012: "Identificación de zonas de importancia ambiental y vulnerabilidad de ecosistemas mediante métodos de evaluación multicriterio (EMC) en el entorno de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). (GESIG-UNLU, Luján). Año 4, N° 4, Sección I: pp. 56-76. On-line: [www.gesig-proeg.com.ar](http://www.gesig-proeg.com.ar).
102. Santos, P. & Cocero M. 2006: *Los SIG raster en el campo medioambiental y territorial: ejercicios prácticos con IDRISI y MiraMon*. Madrid: UNED.

103. Scoble, M.J. & Muftuoglu, Y.V. 1984: *Derivation of a diggability index for surface mine equipment selection*, Mining Science & Technology 1, pp. 305-322.
104. Singh, R.N; Denby, B. & Egretli, I. 1987: *Development of a new rippability index for coal measures excavations*, Proceedings of the 28th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Tuscon, AZ. Balkema, Boston, pp. 935-943.
105. Singh, R.N. 1989: *Aspects of Ground Preparation by Mechanical Methods*, Surface Mining. Symposium of Surface Mining - Future Concepts. April, Nottingham.
106. Singh, M. 2013: Suitability study of ripper-dozer combination in Indian mines (Doctoral dissertation). [Consultado.3 julio 2014]. Disponible en: <http://www.saimm.co.za/Journal/v107n12p817.pdf>.
107. Solis & Rodríguez. 2004: “*Definición racional de ripabilidad o volabilidad de los macizos rocosos. Factores económicos y técnicos*” Curso seguridad y manejo de explosivos, Oviedo, España.
108. Smith, H.J. 1986: *Estimating Rippability by rock mass classification*, Proceedings of the 27<sup>th</sup> U. S. Symposium on Rock Mechanics. Chapter 64 - Poster Papers, pp. 443-448.
109. Tsiambaous, G., Saroglou, H. 2010: Excavatability assessment of rock masses using the geological strength index (GSI). Bull. Eng. Geol. Environ, 69 (1), pp.13–27.
110. University of Arizona. 2006: *Mining & geological Engineering*, “Rock Excavation”, MnE 415-515: course notes- spring, pp: 235-248.
111. Van Westen C.J. 1995: “*GIS in landslide hazard zonation: are view, with examples from the Andes of Colombia*”. En: M.F. Price & D. I Heywood (Editors) *Mountain Environments & Geographic Information Systems*. Taylor & Francis Ltd. pp.135-165.

112. Vinent, J.; Reguefeiros, M. & Kalinin, G. 1983 : *Exploración detallada del Yacimiento "Calizas El Cacao"*. MIMC. Centro Minero Geológico y de Proyectos. Brigada Geológica de Oriente.
113. Voogd, H. 1983: *Multicriteria Evaluation for Urban & Regional Planning*. London, Pion.
114. Weaver, J.M. 1975: *Geological Factors Significant in the Assessment of Rippability*, Civil Engineering in South Africa 17, pp. 313 – 316.
115. Winkler, E.M. 1973: *Stone Properties, Durability in Man's Environment*. Springer-Verlag, New York.
116. [www.rct.net.au](http://www.rct.net.au); Remote control solutions for dozer applications, Remote control Technologies Pvt.Ltd.,Kewdale western Australia. [Consultado.12 dic 2013].
117. Holman, J. P. 2001: *Experimental Methods for Engineers*, 7<sup>th</sup> Ed, pp. 78-80, Mc Graw Hill. [Consultado.6 junio 2014]. Disponible en: <https://www.eol.ucar.edu/system/files/piercescriterion.pdf>.

# ANEXOS



**ANEXO 1. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE EXPERTOS**

|  | Valor                       |
|--|-----------------------------|
| Error admisible                                  | $d = 0,25$                  |
| Probabilidad de fallo                            | $P = 0,2$                   |
| Para $1 - \text{Alfa} = 0,95$ se toma $Z = 1,96$ |                             |
| Número de expertos                               | $n = P (1- P) (Z/d)^2 = 10$ |

## ANEXO 2. ENCUESTA PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE COMPETENCIA DEL EXPERTO

Nombre y apellidos: \_\_\_\_\_

Usted ha sido seleccionado como posible experto para ser consultado respecto al grado de relevancia de parámetros que han sido utilizados por varios investigadores en el proceso de excavabilidad de la roca, tanto en la minería subterránea como a cielo abierto y en obras civiles. Necesitamos antes de realizarle la consulta correspondiente como parte del método empírico de investigación “consulta a expertos”, determinar su coeficiente de competencia en este tema, a los efectos de reforzar la validez del resultado de la consulta que realizaremos. Por esta razón le rogamos que responda las siguientes preguntas de la forma más objetiva posible.

1.- Marque con una cruz (X), en la tabla siguiente, el valor que se corresponde con el grado de conocimiento que usted posee sobre el tema “Excavabilidad de la roca”.

Considere que la escala que le presentamos es ascendente, es decir, el conocimiento sobre el tema referido va creciendo desde 1 hasta 10.

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |

2.- Realice una autovaloración del grado de influencia que cada una de las fuentes que le presentamos a continuación, ha tenido en su conocimiento y criterio sobre la “Excavabilidad de la roca”.

Para ello marque con una cruz (X), según corresponda, en A (alto), M (medio) o B (bajo).

| Fuentes de argumentación  | Grado de influencia de cada una de las fuentes |           |          |
|---|--|-----------|----------|
|   | A (alto)                                       | M (medio) | B (bajo) |
| Análisis teórico realizados por usted                           |  |           |          |
| Su experiencia obtenida   |  |           |          |
| Trabajo de autores nacionales                                   |  |           |          |
| Trabajo de autores extranjeros                                  |  |           |          |
| Su propio conocimiento del estado del problema en el extranjero |  |           |          |
| Su intuición  |  |           |          |

**Muchas gracias**

**ANEXO 3. NOMBRE DE LOS EXPERTOS, SUS COEFICIENTES DE COMPETENCIAS Y SELECCIÓN**

| No | Nombres y Apellidos | Kc     | Ka      | Kcomp   |
|----|---------------------|--------|---------|---------|
| 1  | Exp1                | 0,775  | 0,9125  | 0,88958 |
| 10 | Exp10               | 0,7175 | 0,91861 | 0,88509 |
| 2  | Exp2                | 1      | 0,86111 | 0,88426 |
| 3  | Exp3                | 1      | 0,90889 | 0,92407 |
| 4  | Exp4                | 0,97   | 0,89028 | 0,90356 |
| 5  | Exp5                | 0,97   | 0,93806 | 0,94338 |
| 6  | Exp6                | 1      | 0,86556 | 0,88796 |
| 7  | Exp7                | 0,9425 | 0,96694 | 0,96287 |
| 8  | Exp8                | 0,73   | 0,87194 | 0,84829 |
| 9  | Exp9                | 0,9425 | 0,96    | 0,95708 |

Total de Expertos seleccionados  $M=10$

Coefficiente de competencia promedio  $K= 0,5459$

Los expertos poseen un alto nivel de competitividad de acuerdo a los criterios siguientes:

Competencia Alta                    si                     $K_{comp} > 0,8$

Competencia Media                si                     $0,5 < K_{comp} \leq 0,8$

Competencia Baja                    si                     $K_{comp} \leq 0,5$

**ANEXO 4. CUESTIONARIO ENVIADO A LOS EXPERTOS**

Nombre y apellidos: \_\_\_\_\_.

Institución a la que pertenece: \_\_\_\_\_.

Cargo actual: \_\_\_\_\_.

Calificación profesional, grado científico o académico:

Profesor: \_\_\_\_\_.Licenciado: \_\_\_\_\_.Especialista: \_\_\_\_\_.Master: \_\_\_\_\_.Doctor:  
\_\_\_\_\_.

Años de experiencia en el cargo: \_\_\_\_\_.

Años de experiencia docente y/o en la investigación: \_\_\_\_\_.

Como parte del tema de tesis de Doctorado en Minería se elaboraron propuestas de parámetros para evaluar la facilidad de excavación de la roca en el macizo. Se anexa a esta encuesta dicha propuesta la cual deseo usted consulte, requiriendo su opinión con relación a:

1) Seleccione los parámetros que usted considera más importantes para la evaluación de la excavabilidad de la roca:

1. Velocidad sísmica
2. Índice RMR
3. Tipo de roca
4. Tipo de relleno entre grietas
5. Cohesión
6. Ángulo de fricción residual
7. Estructura de la roca
8. Fallas
9. Porosidad
10. Estratificación
11. Resistencia a la compresión axial
12. Resistencia a la carga puntual
13. Dureza de la roca

- 14. Abrasividad/Erosión
- 15. Tamaño del bloque
- 16. Persistencia o continuidad
- 17. Espaciamiento de las discontinuidades
- 18. Orientación de las discontinuidades.

2) Añada otros parámetros que usted considere deben tenerse en cuenta para evaluar la excavabilidad de la roca.

3) Valore la importancia de los parámetros elegidos teniendo en cuenta una escala de 0 (valor mínimo) hasta 1 (máximo valor).

| No. | Parámetro | Valor |
|-----|-----------|-------|
|     |           |       |
|     |           |       |
|     |           |       |
|     |           |       |
|     |           |       |
|     |           |       |
|     |           |       |
|     |           |       |
|     |           |       |
|     |           |       |
|     |           |       |

**Muchas gracias**

**ANEXO 5. RESULTADOS DE LA SEGUNDA RONDA (REVISAR CRITERIOS Y ELIMINAR ALGUNOS CRITERIOS)**

| EXPERTO                | CRITERIO |      |      |     |     |     |     |     |     |    |      |     |     |     |
|------------------------|----------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|------|-----|-----|-----|
|                        | A        | B    | C    | D   | E   | F   | G   | H   | I   | J  | K    | L   | M   | N   |
| Exp1                   | 1        | 14   | 13   | 2   | 6   | 9   | 10  | 11  | 10  | 14 | 13   | 12  | 11  | 9   |
| Exp10                  | 1        | 12   | 12   | 2   | 7   | 10  | 8   | 8   | 9   | 11 | 11   | 11  | 14  | 9   |
| Exp2                   | 5        | 13   | 14   | 3   | 8   | 8   | 10  | 8   | 9   | 10 | 12   | 10  | 9   | 9   |
| Exp3                   | 5        | 11   | 10   | 5   | 5   | 7   | 9   | 5   | 11  | 9  | 10   | 9   | 9   | 9   |
| Exp4                   | 7        | 8    | 14   | 4   | 7   | 8   | 8   | 8   | 8   | 14 | 8    | 5   | 9   | 9   |
| Exp5                   | 5        | 12   | 9    | 4   | 8   | 9   | 10  | 8   | 9   | 13 | 9    | 9   | 8   | 9   |
| Exp6                   | 4        | 8    | 13   | 5   | 8   | 9   | 8   | 8   | 8   | 10 | 7    | 10  | 7   | 8   |
| Exp7                   | 4        | 12   | 12   | 5   | 5   | 10  | 9   | 11  | 10  | 9  | 10   | 12  | 10  | 7   |
| Exp8                   | 6        | 14   | 8    | 4   | 7   | 11  | 8   | 12  | 9   | 10 | 11   | 9   | 10  | 10  |
| Exp9                   | 6        | 13   | 6    | 3   | 6   | 13  | 11  | 8   | 9   | 10 | 11   | 9   | 10  | 10  |
| Frecuencia Relativa    | 4,4      | 11,7 | 11,1 | 3,7 | 6,7 | 9,4 | 9,1 | 8,7 | 9,2 | 11 | 10,2 | 9,6 | 9,7 | 8,9 |
| Aceptabilidad Promedio | M        | MB   | B    | M   | M   | R   | R   | R   | R   | B  | B    | R   | R   | R   |

A: Velocidad sísmica, B: Índice RMR, C: Tipo de roca, D: Tipo de relleno entre grietas, E: Ángulo de fricción residual, F: Litología, G: Fallas, H: Porosidad, I: Estratificación, J: Resistencia a la compresión axial, K: Tamaño del bloque, L: Persistencia o continuidad, M: Espaciamiento de las discontinuidades, N: Orientación de las discontinuidades.

**Resultados:**

Se hicieron 1 repeticiones.

Se trabajaron los resultados de la repetición 1.

Todos los expertos tienen el mismo peso al calcular las frecuencias.

Se usaron solo los expertos seleccionados.

**ANEXO 6. PRUEBA INFORME. RESULTADOS DE LA PRIMERA RONDA  
(REVISAR CRITERIOS Y AGREGAR NUEVOS CRITERIOS)**

| <b>No.</b> | <b>Criterio</b>                       | <b>Promedio</b> | <b>ESel</b> |
|------------|---------------------------------------|-----------------|-------------|
| 14         | Velocidad sísmica                     | 0,1             |             |
| 07         | Índice RMR                            | 0,7             | X           |
| 06         | Tipo de roca                          | 0,7             | X           |
| 13         | Tipo de relleno entre grietas         | 0,1             |             |
| 17         | Cohesión                              | 0               |             |
| 18         | Ángulo de fricción residual           | 0               |             |
| 12         | Estructura de la roca                 | 0,5             |             |
| 04         | Fallas                                | 0,8             | X           |
| 10         | Porosidad                             | 0,7             | X           |
| 08         | Estratificación                       | 0,7             | X           |
| 09         | Resistencia a la compresión axial     | 0,7             | X           |
| 02         | Resistencia a la carga puntual        | 0,8             | X           |
| 15         | Dureza de la roca                     | 0               |             |
| 16         | Abrasividad/Erosión                   | 0               |             |
| 03         | Tamaño del bloque                     | 0,8             | X           |
| 11         | Persistencia o continuidad            | 0,6             | X           |
| 01         | Espaciamiento de las discontinuidades | 0,9             | X           |
| 05         | Orientación de las discontinuidades   | 0,8             | X           |

**Resultados:**

Se usaron todos los expertos del paso anterior.

**ANEXO 7. RESULTADOS DE LA TERCERA RONDA (FUNDAMENTAR EL VALOR DE CADA CRITERIO)**

| CRITERIO                              | EVALUACIÓN |         |         |        |        |         |          | Evaluación |
|---------------------------------------|------------|---------|---------|--------|--------|---------|----------|------------|
|                                       | E          | MB      | B       | R      | Suma   | CP      | N-CP     |            |
| Índice RMR                            | 1,282      | 1,282   | 1,282   | 1,282  | 5,126  | 1,282   | -0,782   | MB         |
| Tipo de roca                          | 3,49       | 3,49    | 3,49    | 3,49   | 13,96  | 3,49    | -2,99    | E          |
| Fallas                                | 0          | 0,8416  | 3,49    | 3,49   | 7,822  | 1,955   | -1,455   | E          |
| Porosidad                             | -0,8416    | 0       | 1,282   | 1,282  | 1,721  | 0,4304  | 0,06962  | B          |
| Estratificación                       | -3,49      | -3,49   | 0,5244  | 0,8416 | -5,614 | -1,403  | 1,903    | R          |
| Resistencia a la compresión simple    | -1,282     | -1,282  | 0,5244  | 3,49   | 1,451  | 0,3628  | 0,1372   | B          |
| Resistencia a la carga puntual        | 1,282      | 3,49    | 3,49    | 3,49   | 11,75  | 2,938   | -2,438   | E          |
| Tamaño del bloque                     | -0,8416    | -0,8416 | 0,2533  | 3,49   | 2,06   | 0,515   | -0,01498 | B          |
| Persistencia o continuidad            | -3,49      | -3,49   | -0,2533 | 0,2533 | -6,98  | -1,745  | 2,245    | M          |
| Espaciamiento de las discontinuidades | -3,49      | -1,282  | 0       | 1,282  | -3,49  | -0,8725 | 1,373    | R          |
| Orientación de las discontinuidades   | -3,49      | -0,8416 | 0       | 0,5244 | -3,807 | -0,9518 | 1,452    | R          |
| Puntos de Corte                       | -0,9883    | -0,1931 | 1,28    | 2,083  |        |         |          |            |

**Resultados:**

Se tomó como mejor calificación el valor 1 y como peor calificación el valor 11

Se hicieron 1 repeticiones

Se trabajaron los resultados de la repetición 1

Todos los expertos tienen el mismo peso al calcular las frecuencias

Se usaron todos los expertos del paso anterior