

Caracterización del grado de alteración en roca y su influencia en la ingeniería geotécnica, Estado del Arte

Characterization of the degree of alteration in rock and its influence on geotechnical engineering, State of the Art

José Ale

Mine Engineering & Stability Leader / Technical Manager, WSP Peru, jose.ale@wsp.com

Juan José Clariá

Dr. Ing. Civil, Profesor Titular Mecánica de Suelos (Geotecnia II) y Fundaciones (Geotecnia III), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, jclaria@unc.edu.ar

RESUMEN: La determinación del grado de alteración de la roca intacta es una herramienta de gran importancia en la caracterización geotécnica de macizos rocosos. Los procesos de meteorización/alteración producen cambios mineralógicos en el material rocoso que afectan a las propiedades físicas y mecánicas del macizo. En la mecánica de rocas actual, los diseños geotécnicos se basan en tres aspectos fundamentales del macizo: grado de alteración de la matriz, estructuras e hidrogeología. Dada la importancia de la alteración, este artículo presenta una recopilación de los principales métodos tanto cualitativos como cuantitativos para obtenerla utilizados en el estado actual de la práctica, y como se interrelacionan con los sistemas de clasificación geomecánicos. Finalmente, se presenta un ejemplo para evaluar cómo el grado de alteración de la matriz rocosa afecta a los sistemas de clasificación geomecánica más empleados, el RMR y el GSI, y cómo impacta en la estabilidad de un talud evaluada mediante equilibrio límite. El análisis evidencia que el GSI es más sensible que el RMR a la meteorización de la roca, generando un rango de variación en los factores de seguridad más amplio que el RMR para iguales márgenes de alteración.

ABSTRACT: Determining the degree of alteration of intact rock is a tool of great importance in the geotechnical characterization of rock masses. Weathering/alteration processes produce mineralogical changes in the rock material that affect physical and mechanical properties of the rock mass. Currently, in rock mechanics, the geotechnical designs are based on three fundamental aspects: alteration degree, structures and hydrogeology. Given the importance of alteration, this paper presents a compilation of the main qualitative and quantitative methods to obtain the degree of weathering of the rock used in the current state of practice, and how they interrelate with the geomechanics classification systems. Finally, an example is presented to evaluate how the weathering degree of the rock matrix influences the most used geomechanical classification systems, the RMR and the GSI, and the way it impacts on slope stability assessed by limit equilibrium. The analysis reveals that GSI is more sensitive than RMR to the rock weathering, generating a wider range in the safety factors than RMR for the same alteration span.

KEYWORDS: weak rock, weathering, alteration, rock mechanics, rock mass.

1 INTRODUCCIÓN

La determinación del grado de alteración de la roca intacta es una herramienta de gran importancia en la caracterización geotécnica de los macizos rocosos. Los procesos de intemperismo y/o alteración, no solo producen cambios en la resistencia de la roca intacta, sino que además generan variaciones en las propiedades elásticas e hidráulicas del macizo rocoso que influyen en el comportamiento geotécnico. Actualmente, los diseños de ingeniería de rocas se basan en modelos geotécnicos fundamentados en tres elementos principales: alteración de la matriz rocosas, estructura e hidrogeología.

En los inicios de la mecánica de rocas, se estudió, clasificó y caracterizó el comportamiento de los macizos rocosos inalterados, hasta ligeramente alterados. En años recientes se ha intensificado el estudio de los macizos rocosos alterados y se han propuesto sistemas de clasificación y / o gradación del nivel de alteración a

la que se encuentra la roca intacta. Muchas de estas clasificaciones iniciales estuvieron basadas en inspecciones visuales (de manera cualitativa), mientras que en los últimos años se propusieron metodologías cuantitativas fundadas en mediciones de los cambios mineralógicos que ocurren en la roca fresca.

Dada la importancia de la descripción del grado de alteración de las rocas intemperizadas para ser usadas con propósitos ingenieriles, la misma sigue siendo un tema de debate en el presente. El presente artículo muestra una compilación de los principales métodos clasificación geomecánica usados en la práctica actual, así como los métodos de obtención del grado de alteración/intemperismo de la roca (cuantitativos y cualitativos) desarrollados en los últimos años.

Asimismo, se realiza un análisis de la influencia de la alteración en los sistemas de clasificación GSI y RMR, y qué impacto ejercen en el análisis de estabilidad de un talud.

2 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE MACIZOS ROCOSOS

En cualquier proyecto ingenieril de infraestructura, minería o diseño civil, la caracterización geotécnica de un macizo rocoso es de gran importancia, más allá de la caracterización de la roca intacta.

En el último siglo, para caracterizar geotécnicamente los macizos rocosos, se han propuesto diferentes metodologías de clasificación geomecánica que permiten cuantificar las propiedades de resistencia de un macizo rocoso. Estas metodologías de clasificación han ido incorporando parámetros de medición tales como: fracturamiento, resistencia de la roca intacta, presencia de agua, intemperismo, etc.

Estos sistemas de clasificación, muchas veces además de clasificar, proponen metodologías para realizar una caracterización geotécnica de los macizos rocosos, a partir de información de grados de fracturamiento, tipos de discontinuidades, resistencia de la roca intacta, entre otros.

A continuación, se listan los principales métodos de clasificación y caracterización de macizos rocosos desarrollados durante la historia de la mecánica de rocas: Clasificación de Cargas Litostáticas – Terzaghi (1946); Clasificación del Tiempo de Estabilidad – Stini y Lauffer (1958); Índice de la Determinación de la Calidad de Roca (RQD) – Deere et al. (1967); Clasificación de la Estructura de la Roca (RSR) – Wickham et al. (1972); Clasificación del Macizo Rocosos (RMR) – Bieniawski (1976); Clasificación del Macizo Rocosos In-Situ (IRMR) – Laubscher & Jakubec (2001); Clasificación del Macizo Rocosos en Minería (MRMR) – Laubscher (1974); Índice de Calidad de la Roca en Túneles (Q) – Barton (1976); Resistencia del Macizo Rocosos (RMS) – Stille et al. (1982); Índice de Resistencia Geológica (GSI) – Hoek y Brown (1997); Número de Macizo Rocosos (N) y Clasificación de la Condición de la Roca (RCR) – Goel et al. (1995, 1996); Índice del Macizo Rocosos (RMi) – Palmström (1995); Clasificación Geomecánica del Índice de Calidad Básica (BQ); Índice de la Calidad del Macizo Rocosos – Aydan et al. (2013), entre otros.

La influencia de la alteración/intemperismo, es considerada de manera indirecta solamente en algunos de los sistemas de clasificación más actuales, tales como: RMR, IRMR, MRMR, Q, RMS, GSI, RCR, RMi, BQ, RMQR, etc.

3 INFLUENCIA DE LA ALTERACIÓN EN LA CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE MACIZOS ROCOSOS

3.1 Clasificación del Macizo Rocosos (RMR)

Bienawski (1976) agrupó a los macizos rocosos en 5 clases en una valoración de 0 a 100, tal como se ilustra en la Tabla 1.

Posteriormente, en 1989 actualiza su sistema de clasificación, asignando valores para cada uno de los cinco parámetros que se listan a continuación: resistencia la compresión uniaxial (UCS) de la roca intacta (valoración 0-15); índice de la determinación de la calidad de la roca (RQD, valoración 0-20); espaciamiento de las discontinuidades (valoración 0-20); condición de discontinuidades (valoración 0-30); y condición del agua subterránea (valoración 0-15).

De estos parámetros, se puede mencionar que la resistencia de la roca intacta y la condición de discontinuidades, dependen del grado de alteración de la roca.

Tabla 1. Valoración de la clasificación RMR.

Valoración	Número de clase	Descripción
100-81	I	Roca muy buena
80-61	II	Roca buena
60-41	III	Roca regular

40-21	IV	Roca pobre
20-0	V	Roca muy pobre

3.2 Clasificación del Macizo Rocosos In-Situ (IRMR)

Laubscher & Jakubec (2001) introdujeron el sistema de clasificación IRMR (In-Situ Rock Mass Rating) para abordar las preocupaciones sobre la aplicación del sistema MRMR (Mining Rock Mass Rating, el que será descrito más adelante) a un macizo rocoso con discontinuidades. El sistema de clasificación IRMR, introdujo nuevos conceptos, tales como: resistencia a la roca intacta (IRS); resistencia del bloque de roca (RBS); espaciamiento de discontinuidad (Js); y condición de discontinuidades (Jc).

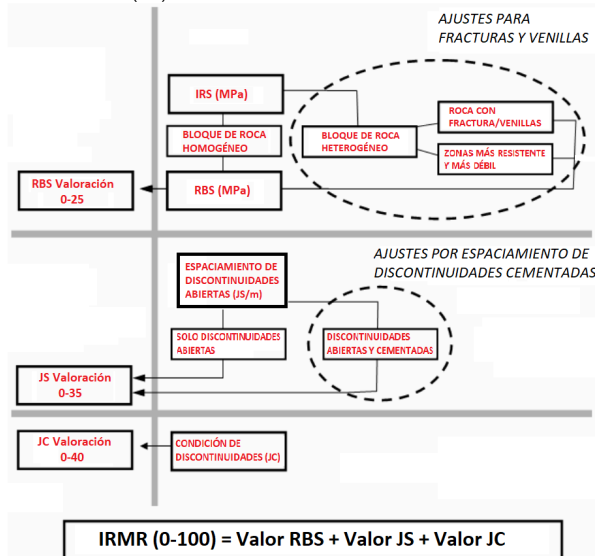


Figura 1. Diagrama de Flujo de la Clasificación IRMR (Modificado de Jakubec & Esterhuizen, 2007).

Como se muestra en la Figura 1, la valoración del IRMR varía de 0 a 100, que corresponde a una variación desde macizo rocoso de muy mala calidad a muy buena calidad, respectivamente. Los parámetros que son afectados por la alteración de roca son: la resistencia del bloque de roca (RBS), y la condición de discontinuidades (Jc).

3.2 Clasificación del Macizo Rocosos en Minería (MRMR)

Desarrollada a partir de la clasificación RMR original, para aplicaciones específicas en minería. Fue propuesta por originalmente por Laubscher (1974) y modificada por Laubscher (1977, 1981, 1984, 1990, 2000), por Laubscher & Taylor (1976), por Laubscher & Page (1990), y por Laubscher & Jakubec (2000 y 2001).

Laubscher (1984) modificó la clasificación del MRMR. Esta clasificación considera valoraciones por resistencia de la roca intacta (de 1 a 20), por valor de RQD (de 0 a 15), por número de familias de discontinuidades (de 0 a 25) y por condición de discontinuidades (de 0 a 40). Los parámetros afectados a la alteración en roca son: la resistencia de la roca intacta, y la condición de las discontinuidades.

Esta misma versión de MRMR (Laubscher, 1984) considera ajustes a las valoraciones de condición de discontinuidades. En la versión de MRMR del 2000 (Laubscher & Jakubec, 2000), el valor del IRMR se ajusta para tener en cuenta los efectos del

intemperismo, de la orientación de las discontinuidades, de los esfuerzos inducidos por minado, de la voladura y del agua. Una vez determinados los factores de ajuste, el valor MRMR se calcula como el producto del valor IRMR y los factores de ajuste, como se muestra en la Figura 2.

Los valores del MRMR varían, como en el sistema RMR, entre 0 y 100 (desde muy mala hasta muy buena calidad), y se divide en cinco clases y diez sub-clases como se muestra en la Tabla 2.

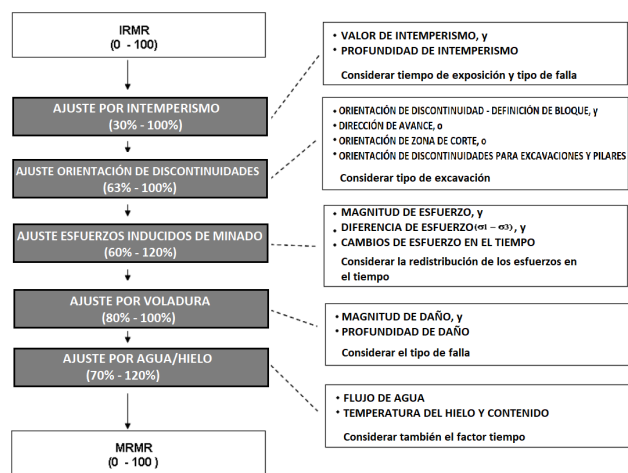


Figura 2. Diagrama de Flujo de la Clasificación MRMR en Base al IRMR (Modificado de Jakubec & Esterhuizen, 2007).

Tabla 2. Valoración de la clasificación MRMR.

Clase	Valoración	Descripción	Sub-Clase
1	100 - 81	Muy buena	A
			B
2	80 - 61	Buena	A
			B
3	60 - 41	Regular	A
			B
4	40 - 21	Pobre	A
			B
5	20 - 0	Muy pobre	A
			B

3.3 Índice de Calidad del Macizo Rocoso (Q)

Barton et al. (1974) propusieron un índice de calidad del macizo rocoso (Q) orientado al diseño de túneles. Este método sigue en uso en la actualidad, aunque ha sufrido numerosas modificaciones.

Barton et al. (1977) modificaron el sistema de clasificación para estimar los requerimientos de soporte de un túnel tanto temporales como definitivos. Hoek & Brown (1980) introdujeron el sistema Q como parámetro de entrada para la estimación del criterio de falla Hoek-Brown para macizos rocosos. Grimstad & Barton (1988) publicaron un ábaco para la determinación de soportes en roca. Løset (1990) determinó una metodología para diseño de soportes en zonas de debilidad. Barton (1991) introdujo la estimación del valor de Q a partir de la medición de las velocidades de refracción sísmica. Barton et al. (1992) incluyeron

la aplicación del sistema Q dentro de método noruego de diseño de túneles (NMT). Grimstad & Barton (1993) actualizaron el sistema Q para el método noruego de diseño de túneles. Barton (1995) introdujo la influencia de las propiedades de las discontinuidades para analizar los macizos rocosos fracturados. Barton (1999) introdujo el desempeño del TBM (Tunnel Boring Machine) en roca. Barton et al. (2001) estudiaron el caso de endurecimiento debido a la inyección de cemento. Finalmente, Barton (2002) consideró nuevas correlaciones para la obtención del valor Q en la caracterización de la roca in-situ y el diseño de túneles.

Tal como definieron originalmente Barton et al. (1974), el valor numérico del índice Q varía en una escala logarítmica desde 0.001 a un valor máximo de 1000, como se muestra en la Tabla 3. Esta valoración es el resultado del producto de tres parámetros del macizo rocoso que son: el tamaño de los bloques (RQD/Jn), la resistencia al corte de las discontinuidades (Jr/Ja), y los esfuerzos activos (Jw/SRF). Finalmente, el valor de Q está definido por:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

Donde:

RQD: Índice de la determinación de la calidad de roca.

Jn: Número por familias de discontinuidades.

Jr: Número por rugosidad de discontinuidades.

Ja: Numero por alteración de discontinuidades.

Jw: Factor de reducción por agua.

SRF: Factor de reducción de esfuerzos.

En este sistema, la alteración afecta al Jr (número por rugosidad de discontinuidades), Ja (número de alteración de discontinuidades) y SRF (factor de reducción de esfuerzos, que depende de la resistencia de la roca intacta).

Tabla 3. Valoración de la clasificación Q.

Descripción de la Roca	Valor Q
Excepcionalmente pobre	0.001-0.01
Extremadamente pobre	0.01-0.1
Muy pobre	0.1-1
Pobre	1-4
Regular	4-10
Buena	10-40
Muy buena	40-100
Extremadamente buena	100-400
Excepcionalmente buena	400-1000

ESTRUCTURA		CONDICIÓN DE SUPERFICIE				
		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con patinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies muy alteradas con arcillas suaves o rellenos suaves
GSÍ PARA ROCAS DIACLASADAS A partir de la litología, la estructura y las condiciones de superficie de discontinuidades, estimar el valor promedio de GSÍ. Tener en cuenta que no aplica en fallas estructuralmente controladas. Donde hay planos estructurales débiles con orientación desfavorable con respecto a la cara de la excavación, estos dominarán el comportamiento de la roca. La resistencia al corte de las superficies en rocas que son propensas al deterioro como resultado de los cambios de contenido de humedad se reducirá si hay presencia de agua. Cuando se trabaja con rocas en las categorías regular a muy pobre, se puede hacer un cambio a la derecha para condiciones húmedas. La presión de agua se trata mediante un análisis de esfuerzo efectivo.		DECRECIMIENTO DE CALIDAD DE SUPERFICIE →				
ESTRUCTURA		DECRECIMIENTO DE CALIDAD DE SUPERFICIE →				
	INTACTO O MASIVO - roca intacta o roca in-situ masiva con pocas discontinuidades muy espaciadas	90			N/A	N/A
	BLOCOSO - macizo sin disturbar bien intertrabado con bloques cúbicos formado por 3 familias intersectantes de discontinuidades	80	70			
	MUY BLOCOSO - macizo intertrabado disturbado parcialmente con bloques angulares de muchas caras formados por 4 o más familias de discontinuidades		60			
	BLOCOSO/DISTURBADO/PEGADO - plegado con bloques angulares formado por muchas familias de discontinuidades. Estratificación/esquistocidad persistente		50			
	DESINTEGRADO - macizo pobremente intertrabado, muy fracturado con una mezcla de partículas angulosas y redondeadas		40		30	
	LAMINADO/CIZALLADO - macizo con ausencia de bloques debido al poco espaciamiento de los planos de corte y esquistocidad		30		20	
			20		10	
		N/A	N/A			

3.4 Resistencia del Macizo Rocoso (RMS)

La resistencia del macizo rocoso (RMS) propuesta por Stille et al. (1982), es una modificación del sistema RMR, ya que incluye los cinco primeros parámetros para la obtención del RMR básico. Este sistema es una reducción del valor del RMR considerando la combinación de tres tipos diferentes de familias de discontinuidades y dos tipos diferentes de discontinuidades.

La resistencia del macizo rocoso para un valor de RMS dado puede ser estimada de acuerdo con la Tabla 4.

Al igual que el RMR, la alteración influye en los parámetros de condición de discontinuidades y resistencia a la roca intacta.

Tabla 4. Valoración de la clasificación RMS.

Valor de RMS	Resistencia del macizo rocoso σ_m (MPa)	Parámetros del criterio de falla de Mohr-Coulomb	
		Ángulo de fricción ϕ	Cohesión (MPa)
100 - 81	30	55°	4.7
80 - 61	12	45°	2.5
60 - 41	5	35°	1.3
40 - 20	2.5	25°	0.8
< 20	0.5	15°	0.2

3.5 Índice de Resistencia Geológica (GSI)

El GSI y su uso en el criterio de falla Hoek-Brown fue desarrollado por Hoek (1994) y presentado en Hoek et al. (1995) y Hoek y Brown (1997). Inicialmente era aplicable para sistemas de rocas duras y daba resultados equivalentes al RMR76.

Hoek et al. (1998) estudiaron materiales rocosos de comportamiento complejo encontrados en túneles en Grecia, lo que derivó en el desarrollo del sistema GSI en su forma actual,

que incluye macizos rocosos de baja calidad (Hoek et al. 1998; Marinos y Hoek 2000, 2001), como se puede ver en la Figura 3.

Como se observa en la Figura 3, en este sistema de clasificación la alteración afecta la condición de la superficie. En la actualidad, el GSI continúa evolucionando como el vehículo principal para la entrada de datos geológicos para el criterio de falla de Hoek-Brown (Marinos et al., 2007).

3.6 Clasificación de la Condición de la Roca (RCR)

El sistema RCR propuesto por Goel et al. (1996) varía del sistema RMR en la sustracción de la valoración de la compresión uniaxial no confinada (σ_c) de la roca intacta. El sistema RCR se define como:

$$RCR = RMR_{BÁSICO} - Valor_{\sigma_c} \quad (2)$$

3.7 Índice del Macizo Rocoso (Rmi)

Desarrollado por Palmström (1995) para la estimación de sostenimiento de túneles de manera simplificada. El índice del macizo rocoso (Rmi) es un parámetro volumétrico que indica, de forma aproximada, la resistencia a la compresión uniaxial de un macizo rocoso.

Figura 3. Abaco de Obtención de Valores de GSI (Modificado de Hoek et al., 2008).

Se expresa cómo:

Para rocas diaclasadas:

$$Rmi = \sigma_c \cdot JP = 0.2 \sqrt{jC} \cdot Vb^D \quad (D = 0.37 \cdot jC^{0.2}) \quad (3)$$

Para rocas masivas:

$$RMi = \sigma_c \cdot f_\sigma = \sigma_c \left(\frac{0.05}{Db} \right)^{0.2} \approx 0.5 \sigma_c \quad (4)$$

Donde:

σ_c : Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta.
 jC : Factor de estado (o condición) de las diaclasas, el cual es una medida combinada de: el factor de tamaño y continuidad de las diaclasas (jL), el factor de rugosidad de las diaclasas (jR), y del factor de la alteración de las diaclasas; expresado como: jA

$$jC = jL \cdot \frac{jR}{jA} \quad (5)$$

Vb : El volumen del bloque medido o expresado en m^3 .

JP : El parámetro del diaclasado, el cual incorpora los principales rasgos del macizo rocoso. Sus valores pueden encontrarse en la ecuación para rocas diaclasadas.

$$JP = 0.2 \sqrt{jC} \cdot Vb^D \quad (6)$$

f_σ : El parámetro de la masividad

$$f_\sigma = \left(\frac{0.05}{Db} \right)^{0.2} \quad (7)$$

representa un ajuste por el efecto de escala en la resistencia a la compresión en una roca masiva. Generalmente existen rocas masivas cuando $Db > 2$ m aproximadamente, para el cual $f_\sigma \approx 0.5$. Cuando $JP < f_\sigma$ (esto es cuando $JP < 0.5$ aproximadamente), se utiliza la ecuación de RMi para rocas diaclasadas.

La Tabla 5 muestra la clasificación de la calidad del macizo rocoso en función a los valores del RMi . La influencia de la alteración de la roca en este sistema, se ve directamente en el factor de alteración de juntas (jA), y de manera indirecta, en la resistencia a la compresión simple de la roca intacta.

Tabla 5. Clasificación de Macizo Rocosos por Valores del RMi (Modificado de Palmström, 1995).

Calidad del Macizo Rocosos		VALOR RMi
Según RMi	Según Resistencia de Macizo Rocosos	
Extremadamente baja	Extremadamente débil	< 0.001
Muy baja	Muy débil	0.001 – 0.01
Baja	Débil	0.01 – 0.1
Moderada	Media	0.1 – 1
Alta	Resistente	1 – 10
Muy alta	Muy resistente	10 – 100
Extremadamente alta	Extremadamente resistente	>100

3.8 Clasificación Geomecánica Índice de Calidad Básica (BQ)

El sistema de clasificación del macizo rocoso unificado de calidad básica (BQ, Basic Quality) es una norma técnica nacional China (GB-50218-94) que se usa en la gran mayoría de obras de ingeniería de rocas en dicho país. La clasificación ingenieril de un macizo rocoso debe llevarse a cabo de manera que las evaluaciones cualitativas y cuantitativas se combinen entre sí. El índice de calidad básica del macizo rocoso BQ se calcula utilizando los parámetros de clasificación Rc (en MPa) y Kv , como se muestra:

$$BQ = 90 + 3 \times Rc + 250 \times Kv \quad (8)$$

Donde:

BQ : Índice de calidad básica del macizo rocoso.

Rc : Índice de solidez de la roca.

Kv : Índice de integridad del macizo rocoso.

Para obtener el índice de integridad Kv de manera cuantitativa, se debe determinar el número de discontinuidades por metro cúbico (Jv), y posteriormente obtener el valor de la Tabla 6.

Tabla 6. Relación Cuantitativa entre el Índice de Integridad (Kv) y Número de Discontinuidades por Volumen (Jv)

Jv (# juntas/ m^3)	de	<3	3 – 10	10 – 20	20 – 35	>35
Kv		>0.75	0.75 – 0.55	0.55 – 0.35	0.35 – 0.15	0.15

Para la obtención cuantitativa del índice de la solidez de la roca (Rc), se utiliza el valor del índice de carga puntual $Is_{(50)}$, a través de la siguiente ecuación:

$$Rc = 22.82 \cdot Is_{50}^{0.75} \quad (9)$$

Puede apreciarse que el valor de Rc , es susceptible a la alteración en roca. El índice de calidad básica del macizo rocoso (BQ) se clasifica de acuerdo con la Tabla 7.

Tabla 7. Clasificación del Índice de Calidad Básica

Tipo de Roca (BQ)	Características Cualitativas de la Calidad Básica del Macizo Rocosos	Índice de Calidad Básica del Macizo Rocosos (BQ)
I	Roca dura, macizo rocoso intacto.	>550
II	Roca dura, macizo rocoso no intacto.	450 - 550
	Roca ligeramente dura, macizo rocoso intacto.	
III	Roca dura, macizo rocoso no muy fracturado.	350 - 450
	Roca ligeramente dura o estratificado con roca blanda.	
	Roca dura, macizo rocoso fracturado.	
IV	Roca ligeramente dura, macizo rocoso fracturado.	250 - 350
	Roca ligeramente blanda estratificada con roca dura y blanda, con predominancia de roca blanda, macizo rocoso no intacto y no muy fracturado.	
V	Roca ligeramente blanda, macizo rocoso fracturado.	≤250
	Roca blanda, macizo rocoso fracturado.	
	Cualquier tipo de roca blanda y todos los tipos de macizo rocoso muy fracturados.	

3.9 Índice de Calidad del Macizo Rocosos ($RMQR$)

El sistema $RMQR$ (Rock Mass Quality Rating) permite estimar las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos a partir de la utilización de las propiedades de la roca intacta, de los parámetros asociados con las discontinuidades, y de la condición del agua, tal como se muestra:

$$RMQR = R_{DD} + R_{DSN} + R_{DS} + R_{DC} + R_{GWSC} + R_{GWAC} \quad (10)$$

Donde:

R_{DD} : Valoración del grado de degradación (1 - 15)

R_{DSN} : Valoración del número de familia de discontinuidades (1 - 15).

R_{DS} : Valoración del espaciamiento de la discontinuidad (0 - 20)

R_{DC} : Valoración de condición de discontinuidad (0 - 30)

R_{GWSC}: Valoración de la condición de infiltración del agua subterránea (0 – 9)
 R_{GWAC}: Valoración de la condición de la absorción del agua subterránea (0 – 6)

Tabla 8. Valores de la Clasificación de la Calidad del Macizo Rocosos (RMQR).

Grado de Degradación (DD)	F	E	M			
			Li	o	In	D
de	re	M	er	er	ns	D
			a	a	a	es
			D	d	D	c
			e	a	e	o
			gr	e	gr	m
			a	d	gr	p
			c	a	d	u
			h	a	a	es
			as	ci	a	ci
				ó	a	ó
	n	ci	ó			
		n	n			
Valor (R _{DD})	15	12	9	6	3	1

Uno de los parámetros más importantes que influye en la resistencia es la meteorización y/o la acción negativa de la alteración en roca, que se puede considerar como el grado de degradación (R_{DD}) de la roca intacta, tal como se muestra en la Tabla 8.

3.10 Resumen

Finalmente, la Tabla 9 resume cómo afecta el grado de alteración de la roca a los métodos de clasificación más modernos.

Tabla 9. Influencia del grado de alteración de la roca en los métodos clasificación geomecánica.

Sistema de clasificación	Parámetro afectado	Descripción
RMR	Resistencia a la compresión de la roca intacta	Un cambio en la resistencia por alteración puede variar la valoración de 15 (roca fresca) a 0 (roca totalmente alterada). De los 5 parámetros que afectan la valoración de la condición de discontinuidad (que varía de 0 a 30), el factor de alteración puede disminuir de una valoración de 6 (roca fresca) a 0 (roca totalmente alterada).
	Condición de discontinuidad por alteración	
IRMR	Resistencia a la roca intacta (IRS)	Un cambio de resistencia podría bajar una valoración de la resistencia del bloque de roca (RBS) desde 25 (roca fresca) a 0 (roca totalmente alterada).
	Condición de discontinuidades (Jc)	Esto puede conllevar a una disminución de la valoración debido a un factor de ajuste del 75%, lo que significa una reducción de 40 (roca

Sistema de clasificación	Parámetro afectado	Descripción
MRMR		fresca) a 30 (roca con paredes alteradas). Las valoraciones de la resistencia a la roca intacta y de condición a discontinuidades, tienen mayor valor e influencia que en el RMR. Considera un ajuste por intemperismo, en función del valor de IRMR, que puede considerar un 30% para roca totalmente alterada.
	Número de alteración de discontinuidades (Ja)	Considera un denominador de un valor hasta 24, que corresponde a rellenos de las juntas con arcilla.
Q	Factor de reducción de esfuerzos (SRF)	Considera un denominador de un valor hasta 10, que corresponde a rocas químicamente desintegradas.
		Es una modificación del RMR que se ajusta por el tipo de familia de discontinuidades.
RMS		
GSI	Condición de superficie	Disminución de la valoración desde 65 (superficie fresca) a 15 (superficie alterada), para una condición media de fracturamiento.
RCR		Es una variación del RMR. Retira la valoración de resistencia de macizo rocoso, y la condición de junta es similar al sistema RMR.
RMi	Resistencia a la compresión de la roca intacta	Se usa el valor directo en Mpa, por lo que la influencia es directa.
	Factor de alteración de discontinuidades (JA)	Similar al sistema Q. Considera un denominador de un valor hasta 20, que corresponde a materiales expansivos en juntas.
BQ	Índice de solidez de la roca (Rc)	Depende de manera directa del valor de la resistencia a la carga puntual (I _{S50}) de la roca intacta
RMQR	Grado de degradación de la roca (R _{DD})	Varía desde 15 (roca fresca) a 1 (roca descompuesta).

4 GRADOS DE ALTERACIÓN EN ROCA

4.1 Alteración en Roca

La alteración implica modificaciones complejas de la roca, las que abarcan cambios mineralógicos, texturales y de composición (Lagat, 2010). Un buen entendimiento de estas relaciones complejas, dependerá de un enfoque descriptivo sistemático multidisciplinario que incluye aspectos de vulcanología, geología de yacimientos, petrología, geoquímica, y mecánica de rocas. Desafortunadamente relativamente pocos estudios han integrado estas disciplinas de manera adecuada (Gifkins et al., 2005).

La integración de las observaciones de las propiedades físicas y de los datos geoquímicos es una poderosa herramienta en el estudio de las rocas alteradas. Las características físicas y las concentraciones de la parte inmóvil (minerales no susceptibles a alteración) de las rocas alteradas pueden ayudar a identificar la roca original, donde los minerales primarios y las texturas originales son concluyentes (Paulick y McPhie, 1999; Barrett et al., 2001). Los cambios físicos y químicos que produjeron la

alteración de la roca pueden ayudar a determinar el grado de intensidad y el tipo (sioquímica o metasomática) de la misma, y a discriminar los procesos de degradación que están ocurriendo, tales como: diagénesis, metamorfismo y alteración hidrotermal (Offler y Whitford, 1992; Gifkins y Allen, 2001). Este enfoque integrado puede conducir al desarrollo de guías de exploración de yacimientos minerales (Large et al., 2001).

El término “alteración hidrotermal” hace referencia al efecto del agua o fluidos a altas temperaturas sobre las rocas. Estos fluidos hidrotermales son en su mayoría de origen magmático (Giggenbach, 1997). Es un término general que incluye la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas debido a un cambio ambiental (químico y de temperatura) debido a la presencia de agua, vapor o gas a altas temperaturas (Vallejo, 2014).

Ceryan et al. (2008) determinaron las posibles rutas de alteración para rocas graníticas, a partir de los minerales formadores de la roca. La Figura 4 muestra los minerales de alteración hidrotermal que se pueden formar a partir de la alteración de los componentes de la roca fresca.

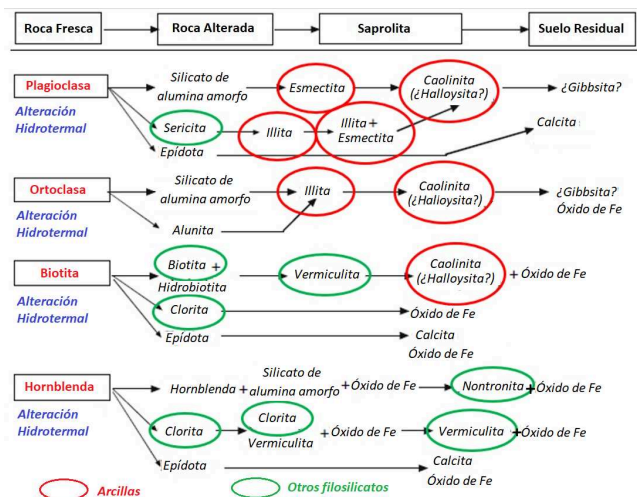


Figura 4. Esquema de transformación de minerales formadores de roca granítica por alteración hidrotermal (modificado de Ceryan et al., 2008).

4.2 Determinación de los grados de alteración

La determinación de los grados de alteración de la roca ha sido estudiada en los últimos 50 años con el objetivo principal de poder entender cómo se degradan las propiedades ingenieriles.

En un inicio, las metodologías de determinación de los grados de alteración eran cualitativas, basados en observaciones visuales o pruebas rápidas de resistencia in campo como el martillo de geólogo u otras herramientas similares.

En la actualidad, se han desarrollado métodos cuantitativos para la determinación de los grados de alteración, los cuales hacen uso de mediciones más detalladas de composición mineralógica y parámetros físicos.

Los principales métodos tanto cualitativos como cuantitativos son brevemente descriptos a continuación.

4.2.1 Métodos cualitativos

Los métodos cualitativos han sido usados ampliamente en los trabajos de investigación geotécnica y geológica de campo, entre los más importes se destacan: Ruxton y Berry (1957); Knill y Jones (1965); Ward et al. (1968); Chandler (1969); Barata (1969); Little (1969); Wackeling (1970); Neilson (1970); Lovegrove & Fookes (1972); Dearman (1974); Dearman et al. (1978); Sancio &

Brown (1980); Brown (1981); Hencher y Martin (1982); Krank & Watters (1983); Martin y Hencher (1986); Campbell (1991); Price (1995);

• NZ Geotechnical Society (2005); y Wilford (2012).

En todos los casos, estos métodos dan una guía para la determinación de los grados de alteración, desde la roca fresca hasta la roca totalmente alterada (suelo residual), en intervalos de 5 a 6 grados.

Dentro de este grupo, la escala más difundida es la propuesta por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1981), que propuso los siguientes grados de intemperismo: I, Roca Fresca; II, Roca Ligeramente Intemperizada; III, Roca Moderadamente Intemperizada; IV, Roca Altamente Intemperizada; V, Roca Completamente Intemperizada; y VI, Suelo Residual.

4.2.2 Métodos cuantitativos

Estos métodos cuantifican la degradación a partir de los minerales de alteración presentes (Figura 4).

Existen una serie de índices que miden el grado de intemperismo (Gupta & Rao, 2001). La gran mayoría de estos, asocian el grado de meteorización con las propiedades químicas, petrográficas e ingenieriles de la roca intacta (Weinert, 1964; Irfan & Dearman, 1978; Lumb, 1962; Mendes et al., 1966; Irfan, 1996). Muchos de estos estudios sobre el intemperismo están relacionados con rocas ígneas graníticas, metamórficas y sedimentarias, pero poca investigación se ha realizado en rocas ígneas volcánicas (Ceryan et al., 2008; Yildiz et al., 2010) y con alteración de tipo hidrotermal.

Lumb (1962) definió un índice cuantitativo de intemperismo que relacionaba el contenido de cuarzo y plagioclasa de la roca fresca (granito de Hong Kong) con el de la roca totalmente alterada, o suelo residual. En rocas ígneas básicas, Weinert (1964) clasificó las etapas de descomposición de la roca en términos del contenido de los minerales secundarios.

Mendes et al. (1966), definieron un índice global de calidad que relaciona los componentes minerales de la roca, los productos de alteración, y otras peculiaridades con el comportamiento mecánico de la roca.

Irfan & Dearman (1978) definieron un índice micropetrográfico y un índice de microfractura calculados a partir del contenido de feldespatos inalterados, feldespatos alterados, cuarzo, biotita, moscovita, biotita alterada, clorita, etc., y microfisuras y vacíos.

Irfan (1996) presenta un índice de movilidad, con el que caracteriza el grado de intemperismo de la roca, relacionando la diferencia del contenido de feldespatos de la roca alterada con respecto a la roca fresca, es decir un índice de descomposición de los feldespatos.

Ya en el siglo XXI, se han propuesto índices de alteración posibles de agrupar en: índices ingenieriles de intemperismo; e índices mineralógicos-petrográficos, tal como se muestran en las Tablas 10 y 11 respectivamente.

Los índices ingenieriles de intemperismo, pueden obtenerse mediante relación entre las propiedades físicas de la roca intacta con los de la roca alterada.

Tabla 10. Índices ingenieriles de intemperismo.

Autor	Descripción
	$R_s = \frac{\sigma_{cA}}{\sigma_{cF}} \cdot 100\%$
Gupta y Rao (2001)	σ_{cA} : Resistencia a la compresión uniaxial de la roca alterada. σ_{cF} : Resistencia a la compresión uniaxial de la roca fresca. R_s : Relación de esfuerzo.

$$K_r = \frac{K_N + K_W + K_R}{3}$$

$$K_N = \frac{N}{N_{fresco}}$$

$$K_W = \frac{W}{W_{fresco}}$$

$$K_R = \frac{R}{R_{intemperizado}}$$

Lan et al. (2003)

N: Relación de vacío.
 W: Absorción de agua.
 R: Resistencia de la roca.
 K_N: Coeficiente de la relación de vacíos.
 K_W: Coeficiente de la absorción de agua.
 K_R: Coeficiente de resistencia.
 K_r: Coeficiente de intemperismo.

$$W = 5.54 - 0.01 \cdot \sigma_t - 0.054 \cdot BPI - 0.00073 \cdot V_p + ($$

Arikan et al. (2007)

σ_t: Resistencia a la tracción de la roca en MPa.
 BPI: Índice de la resistencia a la perforación en MPa.
 V_p: Velocidad de onda P, en m/s.
 n: Porosidad.
 W: Grado de intemperismo.

$$I_{vp} = \frac{V_{pw}^*}{V_{pf}^*}$$

Ceryan et al. (2008a)

V*_{pw}: Velocidad de onda P en la parte sólida de muestras intemperizadas.
 V*_{pf}: Velocidad de onda P en la parte sólida de muestras frescas.
 I_{vp}: Índice de la velocidad de onda P.

$$I_{mp} = \frac{V_{pf}^* - V_{pw}^*}{V_{pf}^*} \cdot 100\%$$

Rigopoulos et al. (2010)

V*_{pf}: Velocidad de onda P en las muestras (sin poros ni fisuras).
 w: Se refiere a rocas intemperizadas.
 f: Se refiere a rocas frescas.
 I_{mp}: Parámetro de cambio mineralógico.

$$I_{fp} = \frac{V_p^* - V_{p^*}}{V_p^*} \cdot 100\%$$

Ceryan et al. (2008b)

V_p: Velocidad de onda P de la muestra seca.
 V*_p: Velocidad de onda P de la misma muestra sin considerar poros ni fisuras.
 I_{fp}: Parámetro de cambio físico.

$$I_{ad} = \sqrt{\frac{(I_{fp})^2 + (I_{mp})^2}{2}}$$

I_{ad}: Parámetro de estado de intemperismo.

$$K_{id} = K_{smp} \cdot I_d$$

Ceryan (2015)

K_{smp}: Valor k de la muestra.
 I_d: Índice de durabilidad en %.
 K_{id}: Índice de durabilidad-k.

$$K_{r4} = \frac{\left(\frac{I_w}{I_f}\right) + \left(\frac{V_{pw}}{V_{pf}}\right) + \left(\frac{n_w}{n_f}\right) + \left(\frac{QAI_w}{QAI_f}\right)}{4}$$

Khanlari y Naseri (2016)

w: Representa las muestras intemperizadas.
 f: Representa las muestras frescas.
 I_s: Índice de carga puntual.
 V_p: Velocidad de onda P.
 n: Porosidad.
 QAI: Índice de absorción de agua.
 K_{id}: Coeficiente de intemperismo.

Los índices de alteración mineralógicos-petrográficos, se basan en la comparación de la distribución de los componentes minerales de la roca fresca versus la roca alterada. Esta distribución de minerales puede ser medida en peso o en volumen. Por lo general, se toma como referencia los minerales formadores de la roca, para poder determinar la variación de su contenido dependiendo del grado de alteración.

Tabla 11. Índices mineralógicos-petrográficos.

Autor	Descripción
	$I_{PS} = \frac{S_o}{H} + \frac{S_e}{P}$ <p>S_c: Contenido de minerales secundarios (formados por procesos de metamorfismo) junto con las microfracturas, en %. P: Contenido de minerales primarios (formados por procesos de magmatismo), en %. S_o: Minerales blandos (dureza ≤ 5, en escala de Mohs), en % de volumen. H: Minerales duros (dureza > 5, en escala de Mohs), en % de volumen. I_{ps}: Índice de resistencia micropetrográfica.</p> $I_{rep} = \frac{\sum_{i=1}^n AP_i}{\sum_{j=1}^m PM_j}$ <p>AP: Producto de alteración de minerales máficos primarios, en % de volumen. PM: Minerales máficos primarios, en % de volumen. I_{rep}: Índice de reemplazamiento.</p> $MI = \frac{UC_A}{UC_f} \cdot 100\%$ <p>UC_A: Relación en peso de los componentes inestables de la roca alterada (minerales de alteración e inestables, tales como esmectita, caolinita, calcita, dolomita, goetita, sulfuro de manganeso, pirolusita, y holandita). UC_f: Relación en peso de los componentes inestables de la roca inalterada/fresca. MI: Índice de alteración mineralógica.</p>

	$k_{LI} = \frac{k_F - k_{smp}}{k_F}$ $k_{PI} = \frac{k_{smp} - k_{FP}}{k_F}$ $k_{TWI} = k_{LI} + k_{PI}$
Ceryan (2011) Ceryan (2015)	k: un mineral en específico k _F : Valor de k para la roca fresca. k _{smp} : Valor de k para la muestra de roca intemperizada. k _{FP} : Valor de k para la porción fresca de la roca intemperizada. k _{LI} : Valor del índice de k debido a lixiviación. k _{PI} : Valor del índice de k debido a productos de intemperismo. k _{TWI} : Valor del índice de k a intemperismo total.
	$N_f = \frac{\sum_{i=1}^n A_{(i)}}{A_{(m)}} \cdot 100\%$
Hu et al. (2014)	A _(i) : Área visible del vacío dentro del mineral ensayado. n: Cantidad acumulada de vacíos visibles dentro del mineral ensayado. A _(m) : Área total del mineral ensayado. N _f : Índice de grado de solución de plagioclasa.
	$MI = \frac{\text{Número de fisuras}}{50 \text{ mm}}$
	MI: Índice de intemperismo físico.
	$D_{pob} = \frac{D_{intemperizado}}{D_{total}} \cdot 100\%$ <p>(D = Plagioclasa + Ortoclasa + Biotita)</p>
Momeni et al. (2015)	D _{intemperizado} : Se refiere a las partes descompuestas de los tres minerales. D _{total} : Se refiere a todas las partes (descompuestas y frescas) de los minerales. D _{pob} : Índice de intemperismo químico.
	$RS_{(i)} = \frac{R_w}{R_f}$
	w: Representa las muestras intemperizadas. f: Representa las muestras frescas. RS _n : Índice de retención.
Ale et al. (2023)	IMA= IMA: Índice de minerales de alteración. MAH _{alt} : Minerales de alteración de la roca alterada. MAH _{fres} : Minerales de alteración de la roca fresca.

5 INFLUENCIA DE LA ALTERACIÓN EN EL COMPORTAMIENTO INGENIERIL DE UN MACIZO

A pesar de que existen sistemas de clasificación geomecánica más actuales, en el estado de la práctica de la mecánica de rocas, los sistemas de clasificación de macizos rocosos más usados son el RMR y el GSI.

A continuación, y a los fines de ejemplificar el impacto que la alteración tiene en la clasificación y comportamiento ingenieril de un macizo rocoso, se presenta un análisis de cómo influye la degradación de la roca en cada uno de estos sistemas.

Tabla 12. Influencia de la alteración en la clasificación RMR y GSI de un macizo.

Sistema		RMR		GSI	
		R	M	G	S
Parámetro analizado		Resistencia axial compresiva (MPa)	Condición de junta (°)	Condición de superficie	Disminución (%)
Valoración del parámetro	Roca fresca	15	30		
	Roca medianamente alterada	7	27		
	Roca totalmente alterada	0	24		
Clasificación del macizo	Roca fresca	72.5 (clase II – roca buena)	100%	65	100%
	Roca medianamente alterada	61.5 (clase II – roca buena)	85%	40	62%
	Roca totalmente alterada	51.5 (clase III – roca regular)	71%	15	23%
Consideraciones		Valor medio en valoración por RQD,		Valor medio de	

	espaciamiento de discontinuidades, y condición de agua subterránea	fracturamiento
--	--------------------------------------------------------------------	----------------

La Tabla 12 muestra un análisis simplificado cómo disminuye porcentualmente la puntuación y clasificación de un macizo al variar el grado de alteración de la roca intacta, manteniendo los demás parámetros constantes. Se asume una condición media de espaciamiento de discontinuidades, RQD, condición de agua subterránea, y parámetros de condición de juntas.

En la Tabla 12 puede apreciarse que en el sistema RMR, al variar la alteración desde roca fresca a totalmente alterada, la clasificación del macizo decae en su valor numérico desde un valor de 72 a 51. Si asumimos que un RMR de 72 es el 100 % del valor alcanzable por el macizo cuando la roca está totalmente fresca, en el caso de que la roca se alterara totalmente, el valor de RMR de 51 implicaría que el mismo es el 71 % del RMR con matriz fresca. En términos de calidad de roca, esto equivale a descender de clase II (roca buena) a clase III (roca regular).

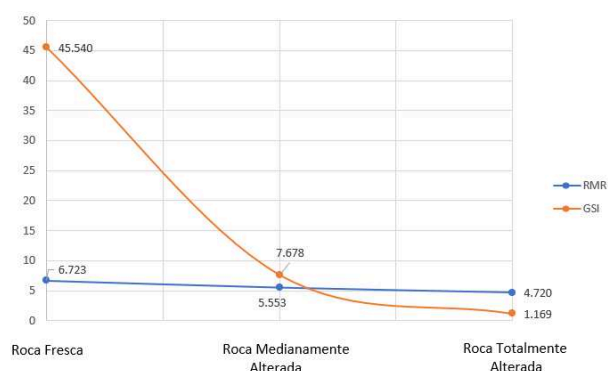
Para darle significación ingenieril, si tenemos en cuenta que:

- Para RMR = 73: cohesión = 350 kPa y $\phi = 40$ grados.
- Para RMR = 52: cohesión = 250 kPa y $\phi = 30$ grados.

Al verificar la estabilidad de un talud de 20 m de altura con un ángulo de inclinación (β) de 45° aplicando equilibrio límite, notaríamos que el coeficiente de seguridad del talud varía desde 6.7 para roca fresca a 4.7 para roca totalmente alterada. De estos análisis se desprende que en el RMR la alteración de la matriz rocosa tiene poco impacto en la estabilidad del talud.

Por el contrario, haciendo un análisis similar pero empleando el método GSI, la puntuación desciende de 65 a 15 al variar la alteración de la matriz roca desde sana a totalmente meteorizada (el GSI disminuye desde el 100 % para roca sana a un 23 % para roca totalmente meteorizada), lo que implicaría empleando el criterio de Hoek y Brown, para el mismo talud de 20 m de altura y un ángulo de inclinación de 45°, una apreciable disminución en el coeficiente de seguridad desde 45.5 a 1.2 (coeficientes calculados con equilibrio límite).

Figura 5. Variación de factores de seguridad en análisis de equilibrio límite, usando clasificación GSI y RMR, para diferentes grados de



alteración de roca.

De este sencillo análisis se observa cómo el grado de alteración influye el comportamiento ingenieril del macizo. El mismo nos permite concluir que el método GSI es notablemente más sensible a la alteración que el RMR, tal como se ve en la Figura 5.

Para evaluar la influencia del grado de alteración medido cuantitativamente sobre el RMR, es posible usar la relación entre la resistencia a compresión de roca intacta (UCS) con su índice de alteración mineralógica (MI) propuesto por Yildiz et al. (2010):

$$UCS = 76.091 - e^{(-0.003MI)}$$

El impacto de la alteración valorada de esta manera sobre el RMR resultan similares a los ilustrados en la Figura 5 con una valoración cualitativa.

6 CONCLUSIONES

La correcta determinación del grado de alteración de la matriz rocosa es clave en la predicción del comportamiento geotécnico de un macizo rocoso.

Se presenta una recopilación de los principales sistemas de clasificación geomecánica de macizos rocosos de uso en el estado del arte actual, destacando el rol que la meteorización de la roca juega en cada sistema.

Se resumen los métodos para calificar el grado de alteración más destacados, incluyendo metodologías cualitativas y cuantitativas, estas últimas basadas en los cambios mineralógicos sufridos por la roca intacta. El uso de la información mineralógica proveniente de los estudios de geología económica para yacimientos minerales, puede ayudar en la determinación preliminar de propiedades geotécnicas en un proyecto minero.

Para fines de comprensión de los métodos cuantitativos, se describe la ruta de alteración de los minerales formadores de roca (ígneas) durante un proceso de alteración hidrotermal. Así se puede saber si los nuevos minerales de una roca alterada se formaron por un proceso de alteración o alguna depositación externa. Se recomienda que se realice este mismo análisis para rocas de naturaleza sedimentaria y metamórfica.

Del estado del arte revisado se aprecia que los sistemas de clasificación geomecánica que se basan en el RMR, tienen la misma influencia de la alteración que el sistema RMR básico.

El GSI, por tener dos parámetros de análisis (condición de superficie y fracturamiento), es notablemente más susceptible a la alteración de roca intacta que el RMR y sus derivados.

Se presenta un ejemplo de aplicación en el que se evalúa la influencia del grado de alteración de la matriz rocosa en la estabilidad de un talud por medio de su coeficiente de seguridad, empleando el sistema RMR y el GSI, concluyéndose que el GSI es más sensible a la alteración de matriz rocosa. Esto se debe a los parámetros considerados en la clasificación geomecánica.

Existen métodos de caracterización cuantitativa del grado de alteración (Yildiz et al., 2010; Ale et al., 2023) que pueden relacionarse con los parámetros físicos de entrada de los sistemas de clasificación geomecánica tal como el RMR y sus derivados.

7 REFERENCIAS

Ale, J. D. y Claria, J. J. 2023. Índice Mineralógico para Caracterización Física de Roca Volcánica Alterada Hidrotermalmente. *Memorias del XXVI Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Comodoro Rivadavia 2023, Argentina.

Arikan, F. y Aydın, N. 2007. Characterization of weathered acidic volcanic rocks and a weathering classification based on a rating system. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, Volume 66, pp. 415-430.

Aydan, Ö., Ulusay, R. y Tokashiki, N., 2013. A new Rock Mass Quality Rating System: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and its application to the estimation of geomechanical characteristics of rock masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Volume 47: pp. 1255-1276.

Barata, F. E. 1969. Landslides in the tropical region of Rio de Janeiro. *Proceedings of International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 7th edition, Mexico City, pp. 507-516.

Barton, N. 1976. The shear strength of rock and rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Volume 13: pp. 255-279.

Barton, N. 1991. Geotechnical design. *World Tunneling*, 6 p.

Barton, N. 1995. The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. Keynote lecture, *Proceedings 8th ISRM Congress*, Tokyo, pp. 1023-1032, Balkema, Rotterdam.

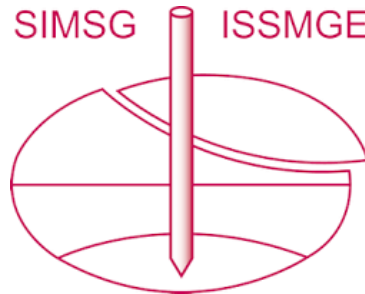
Barton, N. 1999. TBM performance estimation in rock using QTBM. *Tunnels & Tunneling*, September 1999, pp. 30-34.

Barton, N. 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *International Journal of Rock*

- Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Volume 39, pp. 185-216.
- Barton, N., Buen, B. y Roald, S. 2001. Strengthening the case for grouting. *Tunnels and Tunneling International*, pp. 37-39.
- Barton, N., Grimstad, E., Aas, G., Opsahl, O.A., Bakken, A., Pedersen, L., y Johansen, E.D. 1992. Norwegian Method of Tunneling, WT Focus on Norway, *World Tunneling*, June/August 1992.
- Barton, N., Lien, R., y Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Symposium on Rock Mechanics*, volume 6, pp. 189-239.
- Barton, N., Lien R., y Lunde, J. 1977. Estimation of support requirements for underground excavation. *Symposium on Rock Mechanics*, volume 16, pp. 163-177.
- Bieniawski, A. T. 1976. Rock mass classification in rock engineering. *Proceedings of Symposium of Exploration for Rock Engineering*. A. A. Balkema, Cape Town, 1, pp. 97-106.
- Brown E. T. 1981. Rock Characterization, Testing and Monitoring: *ISRM Suggested Methods*. Pergamon Press.
- Campbell, I. 1991. Classification of rock weathering at Writing-On-Stone Provincial Park, Alberta, Canada: Study in applied geomorphology. *Earth Surf Processes Landforms*, Volume 16, pp. 701-711.
- Ceryan, S. 2011. Estimating of the Durability and Weathering State of Rock Materials Using Chemical Weathering Indices based on Cation Packing Value: A Case Study. *Proceedings of 11th International Multidisciplinary Scientific Geoconference*, June 2011, SGEM 2011, Bulgaria, Volume I, pp. 437-444.
- Ceryan, S. 2015. New weathering indices for evaluating durability and weathering characterization of crystalline rock material: A case study from NE Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, Volume 103, pp. 54-64.
- Ceryan, S., Tudes, S. y Ceryan, N. 2008. Influence of weathering on the engineering properties of Harsit granitic rocks (NE Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 67(1): pp. 97-104.
- Chandler, R. J. 1969. The effect of weathering on the shear strength properties of Keuper Marl. *Geotechnique*, Volume 19(3), pp. 321-334.
- Dearman, W. R. 1974. Weathering classification in the characterisation of rock for engineering purposes in British Practice. *Bulletin International Association Engineering Geologist*, Vol. 9, pp. 33-42.
- Dearman, W. R., Baynes, F. J., e Irfan, T. Y., 1978. Engineering grading of weathered granite. *Engineering Geologist*, Volume 12: pp. 345-374.
- Deere, D.U., Hendron, A.J., Patton, F.D. y Cording, E.J. 1967. Design of surface and near surface construction in rock. In: *Failure and breakage of rock*, proceedings 8th U.S. symposium rock mechanics, (ed. C. Fairhurst), 237-302. New York: Society of Mining Engineers, American Institute Mining, Metallurgy Petroleum Engineers.
- Dyke, G. P. 2008. Rock mass characterization: A comparison of the MRMR and IRMR classification systems. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy (ISA IMM)*, Volume 108, N°11, pp. 657-659.
- Gifkins, C. y Allen, R. 2001. Textural and Chemical Characteristics of Diagenetic and Hydrothermal Alteration in Glassy Volcanic Rocks: Examples from the Mount Read Volcanics, Tasmania. *Economy Geology*, Volume 96, pp. 973-1002.
- Gifkins, C., Herrmann, W., y Large, R. 2005. *Altered Volcanic Rocks – A Guide to Description and Interpretation*. Centre Ore Deposit Research, University of Tasmania, Hobart.
- Giggenbach, W. F. 1997. The Origin and Evolution of Fluids in Magmatic-Hydrothermal Systems. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 3rd edition, Barnes editors, John Wiley and Sons, New York, USA.
- Goel R. K., Jethwa, J. L. y Paithankar, A.G. 1996. Correlation Between Barton's Q and Bieniawski's RMR- A New Approach, hit. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Volume 33, N° 2, pp. 179-181.
- Goel, R. K., Jethwa, J. L., y Paithankar, A. G. 1995. Indian experiences with Q and RMR systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 10(1), pp. 97-109.
- Grimstad, E. y Barton, N. 1988. Design and methods of rock support. Norwegian tunnelling today. *Norwegian Soil and Rock Engineering Association*, publication N° 5, pp. 59-64.
- Gupta, A. y Rao, K. 2001. Weathering indices and their applicability for crystalline rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Volume 60, pp. 201-221.
- Hencher, S. R. y Martin, R. P. 1982. The Description and Classification of Weathered Rocks in Hong Kong for Engineering Purposes. *Proceedings of 7th South East Asian Geotechnical Conference*, Hong Kong, Vol. 1, pp. 125-142.
- Hoek, E. 1994. Strength of rock and rock masses. *News Journal ISRM*, Volume 2(2), pp. 4-16.
- Hoek, E. 2007. *Practical Rock Engineering*. E-book. Rocscience.
- Hoek, E. y Brown, E. T. 1980. *Underground Excavations in Rock*. Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Hoek, E. y Brown, E. T. 1997. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Volume 34, pp. 1165-1186.
- Hoek, E., Kaiser, P. K. y Bawden, W. F. 1995. *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam, Netherlands: Balkema.
- Hoek, E., Marinos, P. y Benissi, M. 1998. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for weak and sheared rock masses: the case of the Athens schist formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Volume 57(2): pp. 151-160.
- Hu, B., Li, J., Cui, R., Wei, H., Zhao, J., y Li, G. 2014. Clay mineralogy of the riverine sediments of Hainan Island, South China Sea: implications for weathering and provenance. *Journal of Asian Earth Sciences*, Volume 96, pp. 84-92.
- Irfan T. 1996. Mineralogy, fabric properties and classification of weathered granites in Hong Kong. *Quarterly Journal Engineering Geology*, Volume 29, pp. 5-35.
- Irfan, T. y Dearman, W. 1978. Engineering classification and index properties of a weathered granite. *Bulletin International Engineering Geology*, Volume 29, pp. 5-35.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM). 1981. *Rock Characterization, Testing and Monitoring - Suggested Methods*. Pergamon Press, Oxford, UK.
- Jakubec, J. y Esterhuizen, G. S. 2007. Use of the Mining Rock Mass Rating (MRMR) Classification: Industry Experience. *Proceedings International Workshop on Rock Mass Classification in Underground Mining*, Vancouver, B.C., Canada, National Institute for Occupational Safety and Health Information Circular (IC) 9498, pp. 413-421.
- Khanlari, G. y Naseri, F. 2016. Investigation of physical deterioration of Malayer granitic rocks using a new weathering coefficient (Kr4). *Environmental Earth Sciences*, Volume 75, pp. 414.
- Khanlari, G. R., Heidari, M. y Momeni, A. A. 2012. Assessment of weathering processes effect on engineering properties of Alvand granitic rocks (west of Iran), based on weathering indices. *Environmental Earth Sciences*, Volume 67: pp. 713-725.
- Knill, J. L. y Jones, K. S. 1965. The recording and interpretation of geological conditions in the foundations of the Roseires, Kariba, and Latiyan dams. *Geotechnique*, Volume 15(1), pp. 94-124.
- Krank, K. D. y Watters, R. J. 1983. Geotechnical Properties of Weathered Sierra Nevada Granodiorite. *Environmental & Engineering Geoscience*, Volume XX (2), pp. 173-184.
- Lagat, J. 2010. Hydrothermal Alteration Mineralogy in Geothermal Fields with Case Examples from Olkaria Domes Geothermal Field, Kenya. *Short Course V on Exploration for Geothermal Resources*, UNU-GTP, GDC and KenGen, Kenya.
- Lan, H. X., Hu, R. L., Yue, Z.Q., Lee, C. F. y Wang, S. J. 2003. Engineering and geological characteristics of granite weathering profiles in South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 21, Issue 4, pp. 353-364.
- Large, R., Allen, R., Blake, M. y Herrmann, W. 2001. Hydrothermal Alteration and Volatile Element Halos for the Rosebery K-Lens Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposit, Western Tasmania. *Economy Geology*, Volume 96, pp. 1055-1072.
- Laubscher, D. H. 1974. *Discussion on Engineering Classification of Jointed Rock Masses by ZT Bieniawski*. Civil Engineer in South Africa, South Africa, pp. 239-241.
- Laubscher, D. H. 1977. Geomechanics classification of jointed rock masses - mining applications. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, Section A, pp. 1-8.
- Laubscher, D. H. 1981. Selection of mass underground mining methods. In Stewart, D.R. *Design and operation of caving and sub-level storing mines*. Society for Mining Metallurgy (AIME), New York. pp. 23-38.
- Laubscher, D. H. 1984. Design aspects and effectiveness of support systems in different mining conditions. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, Section A, pp. 70-82.
- Laubscher, D. H. 1990. A geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, Volume 10: pp. 257-273.
- Laubscher, D. H. 2000. *Block Caving Manual*. Prepared for International Caving Study. JKMR/Itasca Consulting Group, Brisbane.
- Laubscher, D. H. y Jakubec, J. 2000. *The IRMR/MRMR Rock Mass Classification System for Jointed Rock Masses*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).
- Laubscher, D.H., y Jakubec, J. 2001. The MRMR rock mass classification for jointed rock masses. In Hustulid, W.A.; Bullock, R.L. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), Littleton, Colorado, USA. pp. 475-481.
- Laubscher, D. H. y Page, C. H. 1990. The design of rock support in high stress or weak rock environments. *Proceedings of 92nd Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum*, Paper # 91.
- Laubscher, D. H. y Taylor, H. W. 1976. The importance of geomechanics classification of jointed rock masses in mining operations. In *Exploration for rock engineering*, (ed. Bieniawski) pp. 119-128.
- Little, A. L. 1969. The engineering classification of residual tropical soils. *Proceedings 7th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Mexico I: pp. 1-10.
- Löset F. 1990. *Using the Q-system for support estimates of small weakness zones and for temporary support* (in Norwegian). Internal NGI Report N° 548140-1, 40 p.

- Lovegrove, G. W., y Fookes, P. G. 1972. The planning and implementation of a site investigation for a highway in tropical conditions in Fiji. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Volume 5(1-2), pp. 43-68.
- Lumb, P. 1962. The properties of decomposed granite. *Geotechnique*, Volume 12, pp. 226-243.
- Marinos, P. y Hoek, E. 2000. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In: Proceedings of GeoEng 2000 at the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering (Melbourne, Victoria, Australia), pp. 1422-1446.
- Marinos, P. y Hoek, E. 2001. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Volume 60: pp. 82-92.
- Marinos P., Marinos V., Hoek E. 2007. Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. Published in: *Underground works under special conditions*, eds. Romana, Peruchó & Olalla, 13-21. Lisbon: Taylor and Francis.
- Martin, R. y Hencher, S. 1986. Principles for Description and Classification of Weathered Rock for Engineering Purposes. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*. Volume 2, pp. 299-308.
- Mendes, F., Aires-Barros, L. y Rodrigues, F. 1966. The use of modal analysis in the mechanical characterization of rock masses. *Proceedings of the 1st International Society of Rock Mechanics Congress*, Lisbon, pp. 217-223.
- Momeni, A., Khanlari, G.R., Heidari, M., Bagheri, R. y Bazvand, E. 2015. Assessment of physical weathering effects on granitic ancient monuments, Hamedan, Iran. *Environmental Earth Sciences*, Volume 74(6): pp. 5181-5190.
- Neilson, J. L. 1970. Notes on weathering of the Silurian rocks of the Melbourne district. *Journal of the Institution of Engineers, Australia*, Volume 42, pp. 9-12.
- New Zealand Geotechnical Society Inc. 2005. *Field Description of Soil and Rock*. Guideline for the Field Classification and Description of Soil and Rock for Engineering Purposes.
- Palmström A. 1995. RMI - a system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering. *Journal of Rock Mechanics and Tunneling Technology*, Volume 1, N° 2, pp. 69-108.
- Palmstrom, A. y Broch, E. 2006. Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. *Tunnels and Underground Space Technology*, Volume 21, pp. 575-593.
- Paulick, H., y McPhie, J. 1999. Facies Architecture of the felsic Lava-Dominated Host Sequence to the Thalanga Massive Sulfide Deposit, Lower Ordovician, Northern Queensland. *Australian Journal of Earth Sciences*, Volume 46, pp. 391-405.
- Price, D. G. 1995. Weathering and weathering processes. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 1995, Volume 28 (3), pp. 243-252.
- Rigopoulos, I., Tsikouras, B., Pomonis, P. y Hatzipanagiotou, K. 2010. The influence of alteration on the engineering properties of dolerites: The examples from the Pindos and Vourinos ophiolites (northern Greece). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 47, Issue 1, pp. 69-80.
- Ruxton, B. P. y Berry, L. 1957. Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong. *Bulletin of the Geological Society of America* 68, pp. 1263-92.
- Sancio, R. T., y Brown, I. 1980. A classification of weathered foliated rocks for use in slope stability problems. *Third Australia - New Zealand conference on geomechanics*, Wellington, May 12-16, 1980. Volume 2, pp. 2.81-6.
- Stille, H., Growth, T. y Fredriksson, A. 1982. *FEM analysis of rock mechanics problems with JOBFEM*. Swedish Rock Engineering Research Foundation and Institution for Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Stini, J. 1950. *Tunnelbaugologie*. Springer Verlag; Vienna, Austria.
- Terzaghi, K. 1946. Rock defects and loads on tunnel support. In Proctor & White (eds.). *Rock Tunneling with Steel Supports*. Youngtown, OH: Commercial Shearing and Stamping Company, vol 1, pp. 17-99.
- Vallejo, C. 2014. Influencia de la Alteración Hidrotermal en la Caracterización Geomecánica del Macizo Rocoso. *ISRM Specialized Conference on Applied Empirical Design Methods in Mining*, Peru.
- Wackeling, T. R. M. 1970. A comparison of the results of standard site investigation methods against the results of a detailed geotechnical investigation in Middle Chalk at Munford, Norfolk. In situ investigations in soils and rocks. *British Geotechnical Society*, London, pp. 17-22.
- Ward, W. H., Burland, J. B., y Gallois, R. W. 1968. Geotechnical assessment of a site at Mundford, Norfolk, for a large proton accelerator. *Geotechnique*, Volume 18(4), pp. 399-431.
- Weinert, H. 1964. *Basic igneous rocks in road foundations*. Council for Scientific & Industrial Research, South Africa, Pretoria, p 47.
- Wickham, G. E., Tiedemann, H.R. y Skinner, E.H. 1972. Support determination based on geologic predictions. In Proceedings: *North American Rapid Excavation and Tunneling Conference*, Chicago, pp. 43-64. New York: Society of Mining Engineers, American Institute Mining, Metallurgy Petroleum Engineers.
- Wilford, J. 2012. A weathering intensity index for the Australian continent using airborne gamma-ray spectrometry and digital terrain analysis. *Geoderma*, Volume 183-184, pp. 124-142.
- Yildiz, A., Kuscü, M., Dumlupınar, I., Arıtan, A. y Bağcı, M. 2010. The determination of the mineralogical alteration index and the investigation of the efficiency of the hydrothermal alteration on physico-mechanical properties in volcanic rocks from Köprülü, Afyonkarahisar, West Turkey. *Bulletin Engineering Geology Environment*, Volume 69, pp. 51-61.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.