



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA
CONSTRUCCIÓN**

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TESIS

**CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES, SOMETIDOS EN AMBIENTES
SATURADOS DE AGUA CON DIFERENTES NIVELES DE
CONTAMINACIÓN, PERTENECIENTES A EDIFICACIONES DE
CARÁCTER PATRIMONIAL.**

**Tesis que Presenta
Arq. Margarita García González**

**Para optar por el grado de
Maestra en Ingeniería Civil con especialidad en Construcción**

TUTOR

Dr. Miguel Ángel Soto Zamora

COMITÉ TUTORIAL

**Dr. Raudel Padilla Ceniceros
Dr. Rubén Alfonso López Doncel**

Aguascalientes, Ags.,30 de mayo de 2021

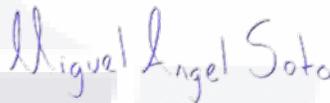
**CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL****DR. EN C. T. C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA**

DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

P R E S E N T E

Por medio del presente como **TUTOR** designado de la estudiante **MARGARITA GARCÍA GONZÁLEZ** con ID **266137** quien realizó la tesis titulado: **CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES, SOMETIDOS EN AMBIENTES SATURADOS DE AGUA CON DIFERENTES NIVELES DE CONTAMINACIÓN, PERTENECIENTES A EDIFICACIONES DE CARÁCTER PATRIMONIAL**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE**“Se Lumen Proferre”****Aguascalientes, Ags., a día 09 de junio de 2021.****DR. MIGUEL ANGEL SOTO ZAMORA****Tutor de Tesis**

**CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL**

DR. EN C. T. C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente como **COTUTOR** designado del estudiante **MARGARITA GARCÍA GONZÁLEZ** con ID 266137 quien realizó la tesis titulado: **CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES, SOMETIDOS EN AMBIENTES SATURADOS DE AGUA CON DIFERENTES NIVELES DE CONTAMINACIÓN, PERTENECIENTES A EDIFICACIONES DE CARÁCTER PATRIMONIAL**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia damos nuestro consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que nos permitimos emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Ponemos lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, le enviamos un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 14 de junio de 2021.



DR. RAUDEL PADILLA CENICEROS
Cotutor de Tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-16
Actualización: 00
Emisión: 17/05/19

**CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL**

DR. EN C. T. C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **MARGARITA GARCÍA GONZÁLEZ** con ID 266137 quien realizó la tesis titulado: **CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES, SOMETIDOS EN AMBIENTES SATURADOS DE AGUA CON DIFERENTES NIVELES DE CONTAMINACIÓN, PERTENECIENTES A EDIFICACIONES DE CARÁCTER PATRIMONIAL**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia damos nuestro consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que nos permitimos emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Ponemos lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, le enviamos un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 14 de junio de 2021.



DR. RUBEN ALFONSO LÓPEZ DONCEL
Asesor de Tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-16
Actualización: 00
Emisión: 17/05/19

Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 27/05/2021

NOMBRE: MARGARITA GARCÍA GONZÁLEZ ID 266137

PROGRAMA: MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL LGAC (del posgrado): ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN

TIPO DE TRABAJO: (X) Tesis () Trabajo Práctico

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES, SOMETIDOS EN AMBIENTES SATURADOS DE AGUA CON DIFERENTES NIVELES DE CONTAMINACIÓN, PERTENECIENTES A EDIFICACIONES DE CARÁCTER PATRIMONIAL

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): ESTA TESIS APORTA AL ESTADO DEL CONOCIMIENTO AL EVALUAR TECNICAS QUE PERMITEN LA CARATERIZACION DE MATERIALES SOMETIDOS A AMBIENTES SATURADOS CON AGUA CONTAMINADA, ADEMAS REALIZA UN ESTUDIO SISTEMATICO DE LA CANTERA HERMOSA, MATERIAL MUY USADO EN EDIFICIOS HISTORICOS EN AGUASCALIENTES

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

INDICAR	SI	NO	N.A. (NO APLICA)	SEGÚN CORRESPONDA:
Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:				
SI				El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI				La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI				Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI				Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI				Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI				El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI				Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
NO				Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI				Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
El egresado cumple con lo siguiente:				
SI				Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI				Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI				Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
N.A.				Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI				Coincide con el título y objetivo registrado
SI				Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI				Tiene el CVU del Conacyt actualizado
N.A.				Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
En caso de Tesis por artículos científicos publicados				
N.A.				Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.				El estudiante es el primer autor
N.A.				El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.				En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.				Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.				La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado: Sí No

Elaboró: **FIRMAS**
 * NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN: DR. MIGUEL ÁNGEL SOTO ZAMORA
 NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO: DR. MARTÍN HERNÁNDEZ MARÍN
 * En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano
 Revisó: DR. ALEJANDRO ACOSTA COLLAZO
 NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:
 Autorizó: Dr. EN C. T. C. HÉCTOR HUMBERTO POSADA ÁVILA
 NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado
 En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma de Aguascalientes por abrirme sus puertas y darme la oportunidad de estudiar esta maestría, es una gran institución su lema es algo que siempre acompañará mi camino “Se Lumen Proferre”.

Al CONACYT por otorgarme una beca con la cual pude desempeñar la maestría ya que sin este apoyo hubiera sido imposible realizar el presente trabajo de investigación.

A mi tutor el Dr. Miguel Ángel Soto Zamora por su apoyo y orientación en la trayectoria de mis estudios, a mi asesor el Dr. Rubén Alfonso López Doncel porque su gran dedicación, amor y empeño por lo que hace, fueron un ejemplo para mí y una luz inmensamente grande para continuar mis sueños, Dios los bendiga. A mis compañeros por mostrarme otro punto de vista acerca del aprendizaje y sobre todo acerca de la manera en que afrontan la vida. A Richard por todas las facilidades y el apoyo que aún las condiciones adversas que vivimos siempre estuvo con una gran disponibilidad para que esto siguiera y saliera adelante.

A mi mamá por su apoyo más que incondicional a lo largo de estos 3 años, sin ti nada de esto sería hoy posible. A mi papá por enseñarme con el ejemplo. A Santiago porque eres uno de mis motores principales que me llevan a querer superarme cada día en los ámbitos personales y profesionales. A Fer porque si no te hubiera aceptado un aventón aquel día, hoy estas palabras no existirían gracias amor por todo tu apoyo.

A mis abuelos porque, aunque se fueron en el camino su luz, fortaleza, dedicación y coraje siempre van a ser parte de mí, yo sé que estuvieron conmigo en todas estas noches de desvelo un beso en donde quiera que estén.

Finalmente, al Arquitecto del Universo que siempre tiene maneras muy sabias de indicarnos el camino.

DEDICATORIAS

Dedico esta tesis a mi hijo Santiago y a mi hermana Marlen esperando que siempre busquen superarse y perseguir sus sueños, encuentren aquello que les llene el corazón y el alma, sean pacientes que puede llegar un poquito más tarde que temprano.



INDICE GENERAL

INDICE GENERAL.....	1
INDICE DE TABLAS	3
INDICE DE FIGURAS	4
ACRÓNIMOS	10
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	14
1.1 Prólogo	14
1.2 Objetivo General	16
1.3 Objetivos Particulares	16
1.4 Alcances	16
1.5 Justificación	17
1.6 Hipótesis	19
CAPITULO II: ESTADO DEL ARTE	20
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO.....	28
3.1 Antecedentes históricos.	28
3.2 Cantera, propiedades petrográficas y petrofísicas.....	30
3.3 Cantera alteraciones y procesos de desgaste.....	36
3.4 Cristalización de sales.....	39
3.5 Agua	42
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA	45
4.1 Técnicas de Recolección de Datos	45
4.2 Variables Operacionales	45
4.3 Determinación del tamaño de la muestra	47
4.4 Diseño del experimento.....	49
4.4.1 Obtención de las muestras	49
4.4.2 Método de tratamiento de agua en la planta tratadora.....	51
4.4.3 Características petrofísicas de las rocas	52

4.4.4. Ensayo de penetración de agua, Tubo Karsten.....	56
4.4.5. Ensayo de compresión simple.....	58
4.4.6 Propiedades Químicas del agua.....	60
4.5 Prueba Piloto	67
4.6 Correcciones al experimento.....	72
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	73
5.1 Propiedades Petrográficas.....	73
5.2 Propiedades de espacio de poro en las rocas.....	75
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES.....	110
6.1 Conclusión General.....	110
6.2 Conclusiones Particulares.....	110
6.3 Nichos de Investigación	113
REFERENCIAS	115
ANEXOS.....	121

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores que predisponen a las edificaciones al daño por agua. (Tremain, 2009)..... 19

Tabla 2. Clasificación de tipo de agua según el radio nominal de sus poros. (F. J. Alonso Rodríguez, 2004) 22

Tabla 3. Clasificación de tamaño de poro. (Moos y Quervain, 1948)..... 32

Tabla 4. Variables Operacionales. Elaboración propia. 46

Tabla 5. Obtención de densidades cantera amarilla. Elaboración propia. 55

Tabla 6. Obtención de densidades cantera verde. Elaboración propia. 55

Tabla 7. Tamaños de poro. (Siegesmund & Snethlage, 2011) 56

Tabla 8. Clasificación de las rocas basados en su resistencia a la compresión según la ISRM. (Feijoo, 2020). 59

Tabla 9. Muestras utilizadas en la prueba piloto. Elaboración propia. 67

Tabla 10. Valores de porosidad y densidad obtenidos en la prueba piloto. Elaboración propia. 68

Tabla 11. Tiempos finales para la experimentación en saturación. Elaboración propia. 72

Tabla 12. Cantera Amarilla, porcentaje de porosidad efectiva (%), densidad de matriz (g/cm³), densidad aparente (g/cm³). Elaboración propia..... 75

Tabla 13. Cantera Verde, porcentaje de porosidad efectiva (%), densidad de matriz (g/cm³), densidad aparente (g/cm³). Elaboración propia. 75

Tabla 14. Cantera Roja, porcentaje de porosidad efectiva (%), densidad de matriz (g/cm³), densidad aparente (g/cm³). Elaboración propia. 75

Tabla 15. Comparativa entre porosidad (%), tamaño promedio de poro (um) y tipo poro en las muestras analizadas. Elaboración propia..... 79

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Monumento a Benito Juárez, Avenida Alameda, Aguascalientes México. Elaboración propia. 18

Figura 2. Representación de materiales isótropos y anisótropos. Modificado de (Ordaz & Esbert, 1988) 30

Figura 3. Planos de discontinuidad en muestra de cantera amarilla. Elaboración propia. 31

Figura 4. Ensayo de compresión uniaxial. Cantabria (2011). Ensayo de compresión (Figura). Recuperado de <https://dmt126.neocities.org/> 35

Figura 5. Método de análisis de las alteraciones en la roca. Modificado de (Benavente García, 2002). 39

Figura 6. Diagrama de saturación-sobresaturación Miers e Isaac. (Benavente García, 2002). 40

Figura 7. Variables Operacionales Cantera Amarilla. Elaboración propia..... 47

Figura 8. Variables Operacionales Cantera Roja. Elaboración propia. 48

Figura 9. Variables Operacionales Cantera Verde. Elaboración propia. 48

Figura 10. Ubicación de la localidad de Clavellinas. INEGI (2014). 49

Figura 11. Banco de cantera y bloque extraído de la localidad de Clavellinas. Elaboración propia. 50

Figura 12. Probetas obtenidas de izquierda a derecha cantera amarilla, rosa y verde. Elaboración propia. 50

Figura 13. Proceso de sistema con lodos activados 52

Sela, G. (2019). Sistema convencional de lodos activados (Figura). Recuperado de <https://cropaia.com/es/blog/lodos-activados/> 52

Figura 14. Horno utilizado para el secado de las rocas. Elaboración propia..... 53

Figura 15. Cámara de vacío. Modificado de Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí..... 53

Figura 16. Extracción de aire y posterior saturación con agua. Elaboración propia 54

Figura 17. Obtención de peso seco (der.) y peso sumergido (izq.). Elaboración propia..... 54

Figura 18. Equipo utilizado en la prueba de absorción Tubo Karsten. Elaboración propia..... 58

Figura 19. Prensa Universal. Elaboración propia..... 60

Figura 20. Cantera Amarilla (izq) ensayo de compresión, Cantera Roja (centro) ensayo de compresión, Cantera Verde (der) ensayo de compresión. Elaboración propia..... 60

Figura 21. Estudios químicos del agua realizados en CCPAMA. Elaboración propia. 61

Figura 22. Escala de pH. Nd. Escala de pH (Figura). Recuperado de <https://www.experimentoscientificos.es>..... 62

Figura 23. Cambios en el peso en gramos de las muestras sometidas a los procesos de saturación y desecación de pruebas piloto. Elaboración propia..... 69

Figura 24. Diferencia entre el 1er y 8vo ciclo (izquierda 1er ciclo, derecha 8vo ciclo), para las muestras expuestas al agua destilada y al agua de lluvia. Elaboración propia..... 70

Figura 25. Diferencia entre el 1er y 8vo ciclo (izquierda 1er ciclo, derecha 8vo ciclo), para las muestras expuestas al agua de lluvia ácida y al agua tratada. Elaboración propia..... 70

Figura 26. Diferencia entre el 1er. y el 8vo. ciclo. (de izquierda a derecha 1er, 3er, 5to y 8vo. ciclo respectivamente), para las muestras tratadas con agua y concentración de Na_2SO_4 . Elaboración propia..... 71

Figura 27. Muestra de cantera amarilla. Elaboración propia..... 73

Figura 28. Muestra de cantera roja. Elaboración propia. 73

Figura 29. Muestra de cantera verde. Elaboración propia. 74

Figura 30. Gráfica de densidad aparente (g/cm³) vs. Porosidad (%). Elaboración propia. 76

Figura 31. Histograma de la distribución del radio de poro Cantera Amarilla (YQ). Dpto. de Geología Estructural de la Universidad de Göttingen, Alemania,(2020). 77

Figura 32. Histograma de la distribución del radio de poro Cantera Verde (GQ). Dpto. de Geología Estructural de la Universidad de Göttingen, Alemania, (2020). 78

Figura 33. Histograma de la distribución del radio de poro Cantera Roja (RQ). Dpto. de Geología Estructural de la Universidad de Göttingen, Alemania, (2020). 78

Figura 34. Cantidad total de agua absorbida por muestra de cantera en ml. a lo largo de 30 minutos. Elaboración propia..... 80

Figura 35. Gráfica de esfuerzo de compresión (MPa) para cada tipo de roca vs tipos de agua utilizada. Elaboración propia. 82

Figura 36. Muestras cantera amarilla sometidas a ensayo de compresión uniaxial, 84

A. Muestra Inalterada, B. Muestra sometida Agua Destilada, C. Muestra sometida Agua Lluvia, 84

D. Muestra sometida Agua Lluvia Ácida, E. Muestra sometida Agua Tratada. Elaboración propia. 84

Figura 37. Gráfica de esfuerzo de compresión (MPa) para cantera amarilla vs tipos de agua utilizada. Elaboración propia. 85

Figura 38. Muestras cantera verde sometidas a ensayo de compresión uniaxial. 86

A. Muestra Inalterada, B. Muestra sometida Agua Destilada, C. Muestra sometida Agua Lluvia, D. Muestra sometida Agua Lluvia Ácida, E. Muestra sometida Agua Tratada. Elaboración propia..... 86

Figura 39. Esfuerzo de compresión (MPa) para cantera verde vs tipos de agua utilizada. Elaboración propia. 87

Figura 40. Muestras cantera roja sometidas a ensayo de compresión uniaxial 88
 A. Muestra Inalterada, B. Muestra sometida Agua Destilada, C. Muestra sometida Agua Lluvia, D. Muestra sometida Agua Tratada. Elaboración propia. 88

Figura 41. Gráfica de esfuerzo de compresión (MPa) para cantera verde vs. tipos de agua utilizada. Elaboración propia. 89

Figura 42. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera amarilla en agua destilada. Elaboración propia. 91

Figura 43. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua destilada. Cantera amarilla. Elaboración propia. 91

Figura 44. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera verde en agua destilada. Elaboración propia. 92

Figura 45. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua destilada. Cantera verde. Elaboración propia. 92

Figura 46. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera roja en agua destilada. Elaboración propia. 93

Figura 47. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua destilada. Cantera roja. Elaboración propia. 93

Figura 48. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera amarilla en agua de lluvia. Elaboración propia. 95

Figura 49. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua de lluvia. Cantera amarilla. Elaboración propia. 95

Figura 50. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera verde en agua de lluvia. Elaboración propia. 96

Figura 51. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua lluvia. Cantera verde. Elaboración propia. 96

Figura 52. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera roja en agua de lluvia. Elaboración propia. 97

Figura 53. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua lluvia. Cantera roja. Elaboración propia. 97

Figura 54. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera amarilla en agua lluvia ácida. Elaboración propia..... 99

Figura 55. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua lluvia ácida. Cantera amarilla. Elaboración propia. 99

Figura 56. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera verde en agua lluvia ácida. Elaboración propia..... 100

Figura 57. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua lluvia ácida. Cantera verde. Elaboración propia..... 100

Figura 58. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera roja en agua lluvia ácida. Elaboración propia..... 101

Figura 59. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua lluvia ácida. Cantera roja. Elaboración propia..... 101

Figura 60. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera amarilla en agua tratada. Elaboración propia. 103

Figura 61. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua tratada. Cantera amarilla. Elaboración propia. 103

Figura 62. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera verde en agua tratada. Elaboración propia. 104

Figura 63. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua tratada. Cantera verde. Elaboración propia..... 104

Figura 64. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera roja en agua tratada. Elaboración propia. 105

Figura 65. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua tratada. Cantera roja. Elaboración propia..... 105

Figura 66. Ciclos de saturación- desecación con muestras saturadas de Na_2SO_4 .
Cantera amarilla. Elaboración propia..... 107

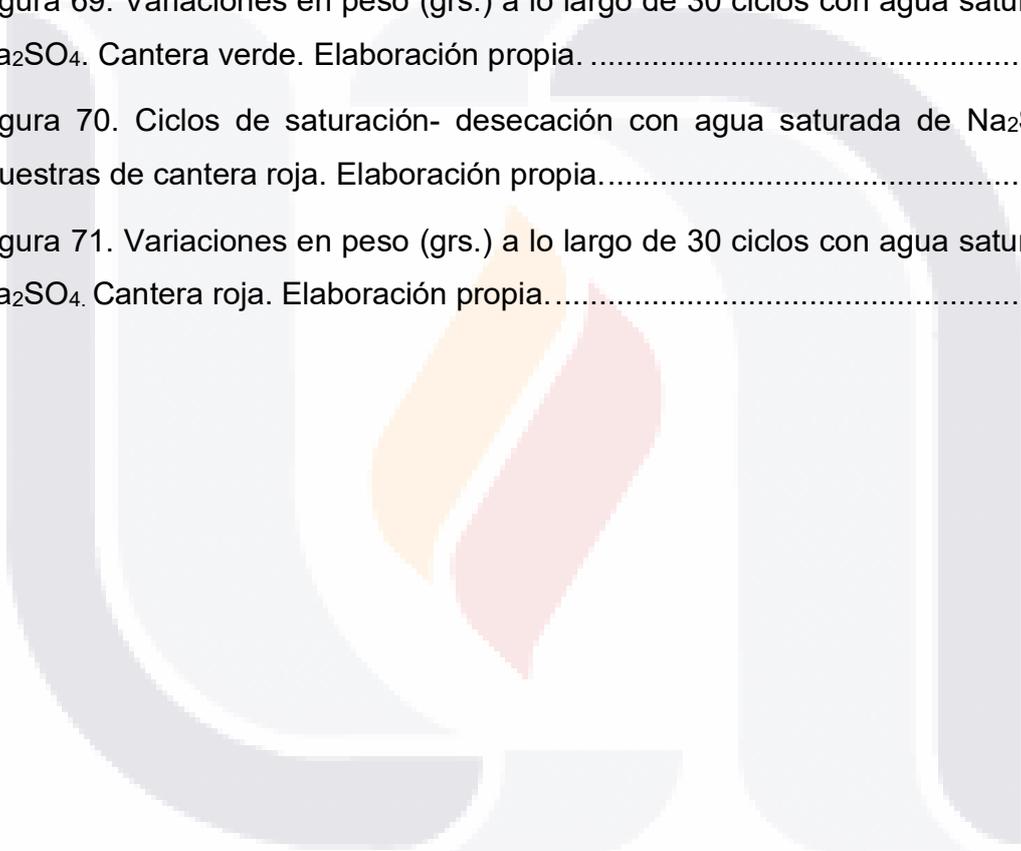
Figura 67. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua saturada de
 Na_2SO_4 . Cantera amarilla. Elaboración propia..... 107

Figura 68. Ciclos de saturación- desecación con agua saturada de Na_2SO_4 en
muestras de cantera verde. Elaboración propia..... 108

Figura 69. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua saturada de
 Na_2SO_4 . Cantera verde. Elaboración propia..... 108

Figura 70. Ciclos de saturación- desecación con agua saturada de Na_2SO_4 en
muestras de cantera roja. Elaboración propia..... 109

Figura 71. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua saturada de
 Na_2SO_4 . Cantera roja. Elaboración propia..... 109



ACRÓNIMOS

Ψ_c	Contenido Crítico de Humedad
a.C.	Antes de Cristo
Ag_2CrO_4	Cromato de Plata
$AgNO_3$	Nitrato de Plata
A.S.T.M.	American Society for Testing and Materials
$BaCl_2$	Cloruro de Bario
$BaSO_4$	Sulfato de Bario
$^{\circ}C$	Grados Celsius
$C_2H_4O_2$	Ácido Acético
CO_3	Carbono
CO_3^{2-}	Carbonato
$CaCO_3$	Carbonato de Calcio
CCAPAMA	Comisión Ciudadana de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Aguascalientes
Cl	Cloruro
$BaCl_2$	Cloruro de Bario
CO_2	Dióxido de Carbono
CO_3	Trióxido de Carbono
D.B.O.	Demanda Bioquímica de Oxígeno
D.I.N.	Deutsches Institut für Normung
D.Q.O.	Demanda Química de Oxígeno
H+	Hidrógeno
H_2O	Agua
H_2SO_4	Ácido Sulfúrico
HCl	Ácido Clorhídrico
HCO_3	Bicarbonato
HO-	Hidróxido
ISRM	International Society for Rock Mechanics
$K_2Cr_2O_7$	Dicromato de potasio

$K_2Cr_2O_4$	Cromato de Potasio
M_{dry}	Masa Seca
$MgSO_4$	Sulfato de Magnesio
MPa/s	Milipascal sobre segundo
M_{sat}	Masa Saturada
M_{sub}	Masa Sumergida
Na_2CO_3	Carbonato de sodio
Na_2SO_3	Sulfito de sodio
Na_2SO_4	Sulfato de sodio
OH	Ion Hidroxilo
pH	Potencial de hidrógeno
ρ_{Bulk}	Densidad Aparente
ρ_{Matrix}	Densidad de Matriz
PPM	Partes por millón
R.I.L.E.M.	Réunion Internatinal des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Mateériaux et les Constructions
μm	Micrones
UAA	Universidad Autónoma de Aguascalientes
UASLP	Universidad Autónoma de San Luis Potosí
UCS	Resistencia a la compresión uniaxial
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

RESUMEN

El conocimiento de cómo los componentes en el agua condicionan el comportamiento de los materiales rocosos debido a su proceso de exposición a esta, es un factor que permitirá una mayor comprensión del daño que pueden sufrir algunas rocas utilizadas en construcción a lo largo del tiempo, el presente estudio tiene como objetivo determinar que efectos se producen en especímenes de “Cantera Hermosa” (una toba volcánica única del estado de Aguascalientes) al someterlas a procesos de intemperismo acelerado como lo es la cristalización por sales. En experimentos de cristalización de sales realizados por Fonseca en 2018 con este tipo de muestra se obtuvo que el comportamiento de esta piedra no resiste más de 11 ciclos para alcanzar su degradación total (Fonseca Monzón, 2018).

En la campaña experimental presentada en esta investigación la composición del agua utilizada en los procesos de saturación se presenta como una variable. Normalmente el agua utilizada en el proceso de cristalización de sales corresponde a una mezcla de Na_2SO_4 con una concentración del 10%, en el presente trabajo además de utilizar la mezcla anterior se utilizaron cuatro tipos diferentes de agua que consideran niveles de contaminación distintos los cuales serán: agua destilada, agua de lluvia, una mezcla de agua con ácido sulfúrico simulando la lluvia ácida y agua tratada.

Los resultados obtenidos verifican como las características en la composición del agua influyen en el proceso de degradación de las piedras y cuáles son las diferencias entre el uso de este tipo de aguas contra el uso de soluciones saturadas de sulfato, con esto podremos deducir si las aguas contaminadas degradan en mayor o menor nivel “La Cantera Hermosa” o si existe una afectación en la composición física original de la roca.

Palabras clave: toba, cantera, cristalización, agua, contaminación.

ABSTRACT

The knowledge of how components in water condition the behavior of rocky materials due to their exposure process to it, is a factor that will allow a greater understanding of the damage that some rocks used in construction can suffer over time, the present study aims to determine what effects are produced in specimens of "Cantera Hermosa" (a unique volcanic tuff in the state of Aguascalientes) when subjecting them to accelerated weathering processes such as crystallization by salts. In salt crystallization experiments carried out by Fonseca in 2018 with this type of sample, she obtained that the behavior of this stone has been shown to resist no more than 11 cycles to reach total degradation (Fonseca Monzón, 2018).

In the experimental campaign presented in this investigation the composition of the water used for salt crystallization processes is inserted as a variable. Normally the water used in the crystallization method, corresponds to a mixture of Na_2SO_4 with a concentration of 10%, in the present work, in addition to using the previous mixture, four types of water that consider diverse levels of pollution will be used, these will be distilled water, rainwater, treated water and a mixture of water with sulfuric acid simulating the effect of acid rain.

The results obtained are intended to verify how the chemical characteristics in the composition of water influence the degradation process of the stones and what are the differences between the use of this type of water versus the use of solutions saturated with sulfate, with this we could deduce if the contaminated waters degrade to a greater or lesser level "La Cantera Hermosa" or if there is an effect on the original physical composition of the rock.

Keywords: Tuff, crystallization, degradation, water pollution.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Prólogo

El concepto de patrimonio cultural según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura es:

“El Patrimonio Cultural de un pueblo comprende las obras de sus artistas, arquitectos, músicos, escritores y sabios, así como las creaciones anónimas, surgidas del alma popular, y el conjunto de valores que dan sentido a la vida, es decir, las obras materiales y no materiales que expresan la creatividad de ese pueblo; la lengua, los ritos, las creencias, los lugares, monumentos históricos, la literatura, las obras de arte y los archivos y bibliotecas.”(UNESCO, 1982).

En la actualidad existen diferentes fenómenos que influyen en el deterioro de las edificaciones catalogadas como patrimonio cultural, en la presente investigación se abordará la degradación que pueden sufrir las piedras de cantera pertenecientes a construcciones de esta índole, considerando la alteración ocasionada debido al factor de agua.

El daño que provoca el agua en los materiales de las edificaciones puede originarse debido a diversos factores, como pueden ser eventos naturales, alteración de las propiedades químicas del agua por efecto de emisiones contaminantes, construcción de obras de infraestructura hidráulica, contaminación de afluentes debido a filtraciones o colapsos en los sistemas de drenaje, entre otras.

Refiriendo los factores de índole natural, pondremos como ejemplo la inundación ocurrida en el año 2010 en el municipio de Tlacotalpan Veracruz, puerto colonial declarado Patrimonio Cultural de la Humanidad, en la cual el desbordamiento del río Papaloapan provocó que el Santuario de la Virgen de la Candelaria (datada del año 1779), quedara 15 días parcialmente bajo el agua.(“Tlacotalpan Se Deteriora Bajo El Agua,” 2010)

En el tema de abastecimiento de agua, algunos estados recurren a la construcción de grandes obras de infraestructura hidráulica como lo son las presas, con la finalidad de abastecer la demanda de consumo esto ha generado que en varias ocasiones, al realizar los estudios de factibilidad los pueblos asentados en lugares

donde se encauzará el caudal de agua tengan que ser reubicados, por ejemplo, en el estado de Aguascalientes durante el año de 1928 en la cabecera municipal del pueblo de San José de Gracia tuvo que ser reubicada debido a la construcción de la presa Presidente Calles, considerada la primera obra hidráulica del país, quedando bajo el agua todos los elementos que conformaban la arquitectura de aquel pueblo de origen chichimeco. (González, 2018).

El factor de degradación de materiales debido a la exposición con aguas negras y residuales sin tratar podemos referir puntualmente el caso del Puente Chicalote localizado en el municipio de Jesús María en la ciudad de Aguascalientes, el cuál cruza el río con el mismo nombre, este río es confluyente al Río San Pedro el puente Chicalote es considerado monumento patrimonial y forma parte de la ruta del Camino Real de Tierra Adentro, dicha estructura se comenzó a construir a finales del Siglo XVIII y finalizó a principios del XIX (“Puente Chicalote, Testigo Fiel de La Historia Del Antiguo Aguascalientes | El Heraldo de Aguascalientes,” 2018), en el podemos observar que el agua que actualmente circula por su basamento corresponde a un caudal de aguas negras de origen municipal, agropecuario e industrial (Ramírez-López et al., 2011).

Finalmente, no dejaremos de lado el tema de absorción de agua en la piedra por capilaridad natural, aunque existen métodos que permiten determinar la cantidad de agua absorbida por una superficie de material durante un periodo de tiempo definido, estas pruebas no han evaluado como la absorción de diferentes contaminantes puede propiciar en mayor o menor medida el desgaste de la piedra. Con el paso de los años las construcciones patrimoniales sufren un desgaste debido a los factores antes descritos y en ocasiones darles mantenimiento resulta una acción en la mayoría de los casos muy difícil, esto resulta en que una parte importante de la historia de estos pueblos se pierde.

Se necesita definir como es el proceso y velocidad de degradación de los materiales en las construcciones que se encuentran bajo condiciones de saturación y desecación por diferentes tipos de agua y así en un futuro poder generar un plan de acción para la conservación, preservación y prevención del patrimonio cultural que se encuentre bajo las circunstancias antes referidas.

Este estudio tiene como finalidad realizar pruebas comparativas en laboratorio del material denominado “Cantera Hermosa”, roca de origen único del estado de Aguascalientes, se utilizarán 3 variables de color de esta roca que serán: rosa, amarilla y verde, estos materiales fueron utilizados en diversas construcciones de carácter patrimonial a lo largo del estado, se buscará determinar la velocidad de los procesos de degradación de los mismos, bajo condiciones controladas de saturación y desecación así como conocer si existen alteraciones en sus características físicas que estén relacionados a la exposición del material al agua.

1.2 Objetivo General

Determinar el efecto que se produce en muestras de Cantera Hermosa debido a los procesos de saturación y desecación utilizando agua con diferentes niveles de contaminación.

1.3 Objetivos Particulares

- A) Describir los métodos existentes para procesos de envejecimiento y degradación por intemperismo acelerado, para rocas.
- B) Analizar y describir cómo se ve afectado el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de los siguientes materiales: Cantera Hermosa variante rosa, amarilla y verde, al someterlos a procesos de cristalización de sales mediante el uso de agua con Na_2SO_4 al 10%.
- C) Analizar, describir cómo se ve afectado el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de las canteras mencionadas en el punto B con la exposición de estas a cuatro tipos diferentes de agua con diferentes niveles de contaminación: agua destilada, pluvial, lluvia ácida (recreada en laboratorio) y agua residual tratada nivel doméstico, así mismo se va a comparar contra los resultados obtenidos en el punto anterior.

1.4 Alcances

Analizar las propiedades petrográficas y petrofísicas de las canteras utilizadas, esto nos permitirá inferir si sus propiedades inherentes tienen repercusión en el proceso de desgaste al utilizar aguas con niveles de contaminación diferentes.

Analizar si los rangos de pH de las aguas ocasionan mayor o menor desgaste en las rocas expuestas.

Evaluar el proceso de desgaste físico experimentado por las canteras a través de ciclos de cristalización por sales, esto con la finalidad de generar indicadores de carácter cualitativo que expongan los daños ocasionados por este experimento.

Evaluar si existe una mayor o una menor capacidad de absorción de agua en las rocas inalteradas y en aquellas que han sido sometidas a los ciclos con aguas contaminadas.

Evaluar el proceso de desgaste físico-mecánico de las rocas a través de su pérdida de masa y su resistencia a la compresión simple lo cual nos dará la posibilidad de hacer una comparativa del desempeño de las rocas previo y posterior a los procesos de saturación con agua de diferentes niveles de contaminación.

1.5 Justificación

La cantera es un material comúnmente utilizado en la construcción, esto se debe a la facilidad de su obtención, a la trabajabilidad que presenta para fines ornamentales y por su durabilidad comprobada a través de su uso durante siglos.

En la actualidad la cantera aún es utilizada para la realización de piezas ornamentales en las construcciones y aquellas edificaciones correspondientes a los siglos XVIII y XIX que utilizaron esta roca para su proceso constructivo se ven expuestas a las inclemencias del tiempo propias de nuestra era las cuales han sido modificadas por factores como lo es la contaminación, la sobrepoblación, el efecto invernadero entre otras.

En el estado de Aguascalientes muchas de las obras patrimoniales están construidas con este material, y son parte de un legado histórico en la ciudad por lo que deben ser tratadas y conservadas adecuadamente, para este propósito es de suma importancia conocer como es el comportamiento de la piedra con el que están labradas un ejemplo es el Monumento a Benito Juárez que se encuentra sobre la Avenida Alameda en el estado de Aguascalientes México (Figura 1) en este caso la Cantera Hermosa ha demostrado tener un deterioro por intemperismo a lo largo del tiempo y se observa que algunas partes sufren mayor desgaste que otras.

Poder comprender si la contaminación del agua al que pueden estar sometidos estos monumentos es un factor importante en su proceso de desgaste nos ayudará a plantear alternativas de conservación de dichos monumentos.



Figura 1. Monumento a Benito Juárez, Avenida Alameda, Aguascalientes México. Elaboración propia.

Es importante y necesario conocer como los factores ambientales pueden dañar los materiales de construcción empleados (Tabla 1) para así, utilizar aquellos que mejor respuesta presenten a factores de intemperismo, para el presente objeto de estudio que es la Cantera Hermosa se analizará como la contaminación presente en el agua puede tener efecto en las propiedades del material.

La realización del presente estudio permitirá conocer el comportamiento de la cantera sometida en ambientes saturados con agua contaminada, recreando posibles escenarios en el cual las piedras se vean afectadas por estos fenómenos lo cual nos ayudará a conocer y determinar el porcentaje de degradación que

puedan presentar dependiendo el nivel de contaminación del agua a la que se encuentren expuestas.

Así mismo los resultados obtenidos serán base para que estudios posteriores propongan estrategias para proteger las edificaciones con base en los resultados obtenidos del proceso de desgaste observado y también será de utilidad para que se puedan implementar los métodos adecuados de conservación para aquellas edificaciones que puedan ser más propensas a encontrarse expuestas a factores de polución por aguas contaminadas.

Tabla 1. Factores que predisponen a las edificaciones al daño por agua. (Tremain, 2009)

Factores que predisponen a las edificaciones al daño por agua		
Naturales	Tecnológicas / Mecánicas	Humanas
Lluvia	Falla en el sistema de alcantarillado	Agua utilizada en limpieza de derrames de sustancias
Granizo	Rotura del sistema de drenaje	Daño por agua tras un incendio
Aguanieve	Fugas de agua	
Inundaciones	Filtraciones	
Huracanes	Canaletas o botaguas tapadas	
Tsunamis	Inundación total o parcial debido a la construcción de presas	
Deshielo		
Aumento del nivel freático		
Localización cercana a una fuente de agua (río, lago, dique, costa)		

1.6 Hipótesis

Las canteras que son sometidas a procesos de saturación y desecación utilizando aguas con diferentes niveles de contaminación bajo condiciones controladas de laboratorio presentan un nivel de deterioro similar observable en el largo plazo que el de las piedras sometidas a ciclos de cristalización por sales.

CAPITULO II: ESTADO DEL ARTE

Son distintas las investigaciones que se han llevado a cabo respecto a la caracterización de piedras en edificaciones de índole patrimonial, en ellos se busca resaltar la utilización de procesos considerados de envejecimiento acelerado.

La revisión del estado del arte del presente trabajo considerará analizar procesos de evaluación de la durabilidad de los materiales rocosos frente al agua como factor de degradación.

Benavente en su tesis de doctorado (Benavente García, 2002) buscó cuantificar la durabilidad de las rocas porosas sometidas a un método de cristalización de sales, apoyándose de ecuaciones preestablecidas por (Scherer, 1999) y con esto cuantificar la durabilidad de las mismas, la estimación de dicha durabilidad se basó en 2 análisis distintos, uno de la roca y otro de la salmuera, para el caso de la roca el proceso fue caracterizar petrológica y petrofísicamente, para la salmuera realizó un estudio químico-físico y un crecimiento cristalino, todas estas pruebas se realizaron en laboratorio bajo métodos controlados, Benavente comenta que en los experimentos convencionales se sumergen por completo las muestras para que un ambiente saturado de agua permita que las sales entren de manera homogénea a la roca, lo cual es muy diferente a lo que pasa con los edificios históricos, ya que por lo general estos se ven atacados generalmente por temas de humedad por capilaridad.

Finalmente propone un nuevo ensayo que acelera la cristalización por sales, acorde con observaciones reales y llegó a la conclusión, que la degradación de las rocas cuando estas entran en contacto con el agua por medio de capilaridad es menos agresiva que aquellas muestras que entraron en contacto con el agua por inmersión. En 2018 se realizó un estudio que culminó en una tesis de maestría titulada "Caracterización de la degradación de las propiedades mecánica de la mampostería por efecto del intemperismo". (Fonseca Monzón, 2018). Su caso de estudio, el templo de San Antonio de Padua, ubicado en el estado de Aguascalientes, presenta los principales factores que definen la degradación de la mampostería por índole

natural, donde nuevamente la cristalización por sales es un factor determinante en la degradación debido a la humedad que se encuentra presente por capilaridad.

La autora somete muestras de mampostería a un proceso de intemperización por medio de ciclos de degradación en los cuales se miden factores que muestran las propiedades mecánicas de los materiales como lo son; resistencia a la compresión, el módulo de Young, y el coeficiente de Poisson.

En esta investigación fue muy difícil poder obtener muestras inherentes del caso de estudio, debido a que no fue posible obtener un permiso por parte del gobierno para dicho fin, por lo que se optó por obtener el material denominado Cantera Hermosa de un banco y degradarlo en laboratorio, once fueron los ciclos de cristalización de sales que se tuvieron que llevar a cabo para concluir que las propiedades mecánicas decaen.

En otra investigación realizada por (F. J. Alonso Rodríguez, 2004) se menciona como es que el agua se encuentra contenida en los materiales rocosos, y explica como este hecho condiciona el comportamiento de las piedras frente a los procesos de alteración debido a dos factores, uno las características de las moléculas de agua y su presencia de carbonatos y silicatos en la superficie, y otro debido a la porosidad de las rocas, ya que estos espacios generan la denominada humedad higroscópica, que condiciona procesos de absorción y desorción en las rocas. Cuando disminuye el contenido de agua Rodríguez observó que estas moléculas se ligan a las moléculas de las rocas y condicionan los comportamientos en los procesos de alteración.

Alonso Rodríguez estudia el estado físico del agua, ya que su hipótesis se encuentra basada en que las moléculas de agua que se encuentran más cercanas a la superficie de la roca están ordenadas en capas, y este ordenamiento disminuye al alejarse de la superficie, busca encontrar una correlación entre el estado del agua en la roca y su dificultad de extracción, para así determinar el estado de secado que puede alcanzar la roca bajo diferentes condiciones ambientales.

Se mencionan 4 tipos de agua presente en las rocas:

1.- Agua de constitución, cristalización o hidratación. Constitucional.

Es el agua que forma parte de la roca, ya sea en las moléculas o en los minerales, es un tipo de agua que al momento de su extracción altera el sólido. Esta agua se encuentra presente en los procesos de cristalización de sal, esta agua de constitución se puede extraer utilizando un punto de secado de 300-500°C.

2.- Agua de adsorción molecular. Higroscópica.

Esta agua se encuentra en la superficie de las rocas, específicamente en los espacios vacíos generados por los poros, las paredes de los poros retienen el agua, dependiendo de las características porosas de las rocas, y por condiciones ambientales como temperatura y humedad.

3.- Agua de condensación capilar. Capilar.

Cuando un ambiente se encuentra saturado con vapor de agua y existen rocas porosas, se da el fenómeno de condensación capilar, el cual consiste en la absorción de agua en la roca a través de sus paredes.

4.- Agua gravitacional o libre.

Las rocas que presentan un sistema poroso mayor a 10 µm permiten el flujo del agua a través de su red porosa, esta agua puede salir fácilmente de la roca por gravedad.

El autor clasifica el tipo de agua que se encuentra presente en la roca puede definirse según su tamaño de poro (Tabla 2) (F. J. Alonso Rodríguez, 2004).

Tabla 2. Clasificación de tipo de agua según el radio nominal de sus poros. (F. J. Alonso Rodríguez, 2004)

Tipo de Agua	Radio Nominal de Poros (µm)
Constitucional	<0,00015
Higroscópica	0,00015 – 0.06
Capilar	0,06 – 4,7
Libre	> 4,7

Un aspecto interesante de esta investigación es que se mencionan dos tipos de adsorción de agua en la roca, la química y la física la primera nos dice que las moléculas de agua quedan inmóviles dentro del sólido siendo muy difícil su extracción a menos que la temperatura de secado de la roca sea mayor a 100°C,

para la adsorción física es totalmente lo contrario las moléculas de agua se mueven libremente por la red porosa de la roca.

Para la revisión crítica del ensayo de cristalización de sales aplicado a los materiales rocosos se utilizó el trabajo de (Alonso et al., 1987) en el cual se menciona la normatividad más utilizada para dichos ensayos entre las que destacan la (R.I.L.E.M., 1980) -ensayos V.1a, V.1b y V 2-, y las (DIN 52111:1990-03 TESTING OF NATURAL STONES; CRYSTALLISATION TEST, 1990) es importante destacar que los autores detallan las variables que afectan al ensayo de cristalización como los son: la naturaleza y concentración de la sal, en la cual al cristalizar el sulfato se considera se puedan presentar dos fases, la anhidra y la hidratada condicionadas con base en la temperatura de secado, temperaturas mayores a 32.4°C cristaliza en fase anhidra y debajo de estas la fase decahidratada. Menciona que la norma R.I.L.E.M. ensayo V.2. considera soluciones saturadas de sulfato al 10% y una temperatura para el secado de 60°C, al ser esta una temperatura que no afecta los componentes de las piedras. Ambas condicionantes se utilizarán en el presente trabajo de investigación.

Es importante hacer mención que, según ensayos llevados a cabo en laboratorio por los autores, la temperatura y tiempo de secado son variables fundamentales para el proceso de cristalización de sales y su agresividad de degradación con las rocas, concluyendo que, secados a temperatura ambiente precisan tiempos mayores y un control de humedad relativa del entorno, y secados en horno aumentan el proceso de degradación de las rocas debido a que la sal se ve forzada a cristalizar en fase anhidra. El número de ciclos recomendado por las normas R.I.L.E.M. es de quince.

Los daños provocados por el ensayo dependen del grado de coherencia y compacidad del material sometido, debido al proceso de cristalización, los poros de la roca rompen ocasionando una pérdida de material que está asociada a las características petrográficas de los materiales. La valoración de los daños producidos en estos a lo largo de los ciclos se basa en la observación de las superficies, el cambio de peso en las muestras y los cambios en sus propiedades físicas.

Para explicar las fases que deben estudiarse en las labores de conservación y restauración en edificios históricos (Prada et al., 1996) consideraron desde la diagnosis de la roca como primer periodo, el aspecto mineralógico, litológico, petrológico y petrofísico. Hacen énfasis en correlacionar las lesiones en los materiales de las edificaciones con los procesos que las generan, que principalmente son: la acción del agua, y la acción de las sales disueltas en estas, la textura de la roca y la conformación de su red porosa. Analizar de manera comparativa los casos de alteraciones entre la cantera como roca y la cantera utilizada en monumentos y utilizan como caso de estudio los sillares del área monumental de Tarragona, España, que presentan un grado de degradación importante. En este estudio realizaron un “*mapping*” el cual determina las formas de alteración de las piedras, concluyendo que estas han perdido un 70% de su volumen original, así mismo determinaron la naturaleza química de las piedras por medio de espectrometría de rayos X, el cual les permitió realizar un análisis intracrystalino de la piedra, concluyendo que estas presentaban una distribución de calcio y magnesio mayor en el núcleo que exteriormente. Respecto a la porosidad, en los sillares más degradados esta es mayor lo que deduce que están correlacionados los procesos de alteración intracrystalino, la formación de poros y la pérdida de volumen.

Los autores coinciden en que el agua que circula por la red porosa de las rocas es capaz de modificar sus minerales y genera sales que posteriormente cristalizan.

(Charola, 2000) Hace una revisión referente al deterioro que es inducido por la sal en los materiales porosos menciona la importancia de comprender como es el movimiento del agua y las sales dentro del sistema de poros de las rocas, esto con la finalidad de comprender la sinergia que se genera entre el material poroso, la sal y el contenido de humedad.

El agua puede entrar en el material poroso en este caso la roca por medio de infiltración o capilaridad, se debe tener en cuenta la permeabilidad que esta presenta, existen dos parámetros que la autora menciona se deben tomar en cuenta que son el punto de transición entre capilaridad y difusión ya que por este medio se define el contenido crítico de humedad (Ψ_c), esta constante depende de la variable de porosidad y distribución del tamaño de poro. Cuando las piedras absorben

humedad se expanden (dilatación hídrica) y cuando se secan se contraen, estos ciclos producen fatiga del material pétreo y cuando en estos ciclos hay sales presentes este efecto permite crear la cristalización.

Un caso de estudio interesante donde se realizaron estudios petrográficos en rocas de construcción de edificios de carácter patrimonial del centro histórico de Santiago de Querétaro fue el trabajo de (Molina Maldonado, 2016) también estudio el comportamiento de estas rocas ante el intemperismo, para esto identificó las características petrográficas y geoquímicas de más de 7 tipos diferentes de ignimbrita según la metodología del Instituto Alemán de Normalización (DIN), sus estudios le permitieron determinar que las condiciones atmosféricas y climáticas de las regiones donde se utiliza la roca son determinantes en su proceso de degradación pero el factor determinante en la resistencia de las rocas naturales son las propiedades de poro.

Sus conclusiones hacen énfasis en las siguientes propiedades; espacio de poro y densidad, propiedades de transporte y retención de agua, propiedades geotécnicas y las propiedades de intemperismo.

Propiedades de espacio de poro y densidad

El autor menciona que es el tamaño de poro existente en las rocas el que regula la cantidad de humedad que puede retenerse en la misma, aquellas con un porcentaje de microporos alto no son capaces de transportar fluidos. Dentro de sus conclusiones se presentaron muestras las cuales dejan pasar fluidos, pero parte de estos quedan atrapados en su porcentaje de microporosidad, la conclusión es que estas muestras pueden contener un porcentaje de arcillas lo que propicia la retención de los fluidos, también se menciona que estas muestras son susceptibles a la meteorización.

Propiedades de transporte y retención de agua.

Estas propiedades tienen relación con el tamaño promedio de poro, a mayor porosidad mayor porcentaje de absorción en un periodo de tiempo más corto. En este apartado se menciona la revisión y distinción en las muestras de los poros entre micro y macroporos ya que el porcentaje de porosidad total nos arroja la suma entre

estos poros y definir si los poros existentes se encuentran en los micro o los macro permite correlacionar estos datos contra el valor de absorción de agua.

Propiedades geotécnicas.

Maldonado realiza una comparativa entre la porosidad, la resistencia de fuerza de partición por tensión y la velocidad de onda ultrasónica, el autor llega a la conclusión de que el grado de soldamiento en las ignimbritas fue determinante para conocer su porcentaje de porosidad ya que a mayor soldamiento menos poros y mayor resistencia en las pruebas de partición por tensión. La conclusión obtenida es que las rocas más porosas tienen una menor resistencia en el experimento de partición por tensión

Propiedades de Intemperismo.

En este capítulo se muestran los resultados de las pruebas de expansión térmica obtenidas en laboratorio donde se encontró que las ignimbritas encogen al aumentar la temperatura esto debido a la composición mineralógica de la roca, así mismo el autor realiza una comparativa de los resultados obtenidos en laboratorio con los daños presentes en rocas utilizadas en la construcción de edificios de índole histórico encontrando nuevamente que el porcentaje de porosidad de la roca es un factor que determina el daño que estas sufren a través del tiempo y que a mayor porcentaje de porosidad presentan patrones mayores de intemperismo.

Finalmente (Siegesmund & Snethlage, 2011) en el cuarto capítulo del libro el cual habla acerca del daño por intemperismo y se menciona los daños que los procesos y reacciones químicas pueden generar en las rocas, Siegesmund describe cuales son las reacciones que más daño provocan en la roca y los patrones que estas alteraciones generan, haciendo énfasis en la alteración química debido a la contaminación atmosférica.

El ataque de ácidos causa que los cationes metálicos presentes en las rocas se movilicen y también la sílice disuelta cuando esta se meteoriza induce que se formen nuevos componentes minerales como son oxihdróxidos de hierro y arcillas. Siegesmund pone como ejemplo la exposición de las rocas a aguas naturales tal como el agua de lluvia e infiere que la reacción de disolución mineral que se genera conduce a la formación de cationes en la roca principalmente: sodio (Na), potasio

(K), magnesio (Mg) y calcio (Ca), finalmente realiza un análisis del pH que se presenta en los tipos de agua.



CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

3.1 Antecedentes históricos.

La cantera se ha utilizado desde tiempos muy remotos para la construcción, debido a su facilidad para trabajar y labrar, su belleza y su uso estructural principalmente en muros y cimentaciones.

Ya en el Siglo I a.C. Vitruvio, mencionaba en su tratado “Los diez libros de Arquitectura”, la importancia, usos y características que presentaba la cantera, todo ello basado en la observación que realizaba de los diferentes lugares en los que se extraía la roca mencionaremos un extracto tomado del Libro II Capítulo VII:

Se mencionaba que la piedra cantera contaba con propiedades únicas y distintas de otras rocas, ya que aquellas de color rojo eran blandas y las de tipo pedernal eran duras. Aquellas blandas tenían la cualidad de que recién extraídas del banco de cantera podían ser manejadas con facilidad y comúnmente las colocaban en lugares cubiertos ya que podían mantener el peso de la obra esto quiere decir que podían ser utilizadas con carácter estructural, pero por otro lado si eran colocadas a la intemperie se desmenuzaban con facilidad y no resistían las inclemencias como hielo o escarcha; y cuando las colocaban en zonas costeras se dieron cuenta que era muy fácil que el salitre las carcomiera. (Vitruvio Polion, n.d.)

Solían utilizar la cantera “Tiburtina” la cual soportaba bien el detrimento causado por condiciones meteorológicas y por el peso propio de las edificaciones, pero que por otro lado no soportaba el fuego ya que este las destruía muy rápidamente se decía que era debido a que la cantera era una piedra seca en su composición natural que poseía poca cantidad de tierra y una gran proporción de aire y fuego.

Como leemos, su conocimiento del proceso de degradación de la cantera era por observación del comportamiento de la piedra en diferentes circunstancias y ambientes, pero es hasta finales del siglo XIX y principios del XX que algunos autores comienzan a estudiar el proceso de presiones por cristalización de sales. (Lavallo, 1853) realiza una investigación del crecimiento de cristales en las rocas pero a temperatura ambiente, experimento que no logró establecer un método de predicción cuantitativo en el deterioro de las rocas, posteriormente (Branner, 1906)

(Taber, 1916) comienzan con los primeros experimentos en los cuales se utilizaba un aparato para hacer crecer cristales bajo presión en una solución saturada con sulfato de cobre a una temperatura constante, estas primeras investigaciones no concluían que proceso era el que lograba generar el estrés en la roca que provocaba su deterioro ya que la saturación que se generaba en las rocas se encontraba condicionada a la saturación constante de la solución y era muy sensible a variaciones provocadas por cambios de peso y temperatura, según (Siegesmund & Snethlage, 2011) fue hasta finales del Siglo XX y principios del XXI que existió un progreso importante en la comprensión científica de la termodinámica del crecimiento de los cristales en los poros de la roca, así mismo varios años tuvieron que pasar para lograr una ecuación aceptable que permitiera calcular las presiones de cristalización para las sales la cual se acepta a nivel general como aquella que calcula la presión de cristalización con base en la distribución del tamaño de poro (Everett, 1961).

La presión por cristalización produce que la roca se someta a esfuerzos de tracción dentro de la matriz, la cual es comparable con las pruebas realizadas en laboratorio (Siegesmund & Snethlage, 2011).

En 1964 Nielsen hablando de la teoría de la nucleación afirmó que se debe tener cierto grado de supersaturación para que esta y el crecimiento de cristales se presenten, lo cual es comprobado en experimentación de cristalización con sales a concentraciones muy altas. (Nielsen, 1964)

Surge la interrogante de que, si solo las soluciones sobresaturadas conllevarán un deterioro en los materiales porosos, (Arnold & Kueng, 1985) comentan que cualquier porcentaje de saturación de sodio puede producir un deterioro en los poros de las rocas y causarles detrimento. Estos deterioros pueden presentar diferentes tipos de patologías que son comúnmente observables en las rocas tales como descamaciones, disgregaciones, alvealizaciones, etc. Ellos encontraron que los porcentajes de elementos más elevados en rocas utilizadas en la construcción y que presentan algún grado de deterioro son: sulfatos (SO_3), cloruros (Cl) y nitratos (NO_3) principalmente.

Como Siegesmund comenta en su libro *Stone in Architecture* (Siegesmund & Snethlage, 2011) el proceso de deterioro de las rocas mediante el método de cristalización con sales ha sido ampliamente estudiado con la finalidad de comprender que tanto deterioro puede generarse en el material lo que ha conllevado a que los científicos sean cada vez más minuciosos con el análisis de las muestras sometidas a este proceso, actualmente estudiar el desgaste de una roca por métodos acelerados conlleva un análisis completo de la muestra que inicia desde conocer el banco de procedencia, hasta analizar bajo el microscopio para conocer su composición mineral.

3.2 Cantera, propiedades petrográficas y petrofísicas.

La cantera se define como una roca ígnea de origen piroclástico (extrusiva), es un material anisótropo ya que su proceso de formación geológica el cual determina su composición mineralógica hace que tengan discontinuidades, defectos, fracturas y fallas lo que va a originar cambios en su resistencia y en su comportamiento ante los esfuerzos.

Propiedades Petrográficas.

Anisotropía

La anisotropía de una roca se define como la asimetría de las propiedades generales de los materiales según la dirección en que estas se estudian (Figura 2).

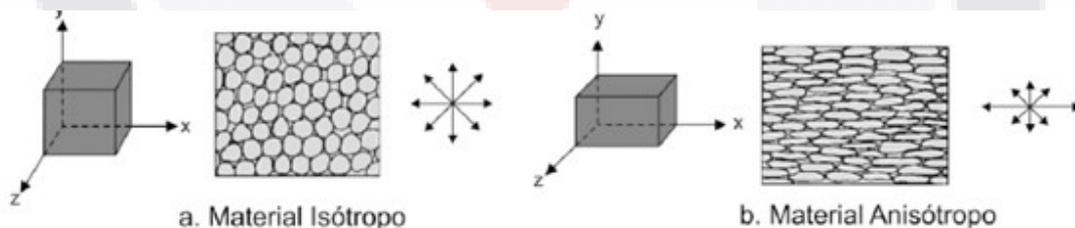


Figura 2. Representación de materiales isotrópicos y anisótropos. Modificado de (Ordaz & Esbert, 1988)

Los modelos de simetría que puede tener una roca son la transversal y la ortotropía, para el modelo transversal los planos de discontinuidad tienen una dirección principal, esto puede observarse (Figura 3) como una misma inclinación al eje vertical y sus planos de discontinuidad (Alencar, 2014), para el modelo de ortotropía

se habla de una simetría cuando se unen dos o más estructuras lineales que sean ortogonales.

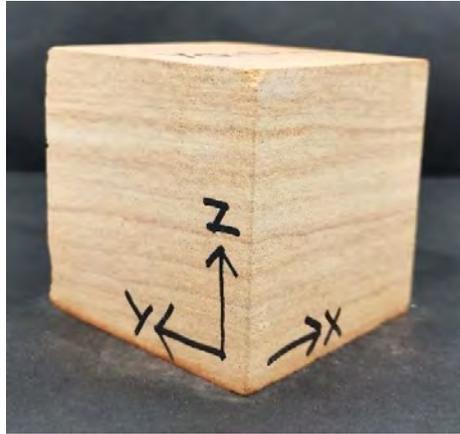


Figura 3. Planos de discontinuidad en muestra de cantera amarilla. Elaboración propia.

Densidad

La densidad de una roca está dividida entre densidad de matriz ρ_{Matrix} y densidad aparente ρ_{Bulk} , para la obtención de estos valores se usará el método de Arquímedes el cual mide el empuje que actuará en una muestra sumergida en agua, en este experimento obtendremos 3 valores, el peso de la muestra totalmente seca (M_{dry}), el peso de la muestra posterior a estar totalmente saturada de agua durante un periodo de tiempo (M_{sat}) y por último el peso de la muestra bajo el agua (M_{sub}). Se utilizará la siguiente multiplicación:

$$\rho_{Matrix} = \rho_{water} \times (M_{dry}/M_{dry} - m_{sub}) \quad [1]$$

$$\rho_{Bulk} = \rho_{water} \times (M_{dry}/M_{sat} - m_{sub}) \quad [2]$$

Porosidad

La porosidad de un material rocoso se obtiene dividiendo el valor del volumen de los poros entre el volumen total de una roca, esta se divide en porosidad efectiva (poros que se encuentran interconectados y son accesibles entre sí) y porosidad total (poros a los cuales no pueden acceder los fluidos).

La porosidad es el parámetro más importante para el estudio de una roca ya que es un factor clave para las determinaciones del comportamiento y las propiedades físicas de las rocas.

Los tamaños de poro pueden clasificarse siguiendo la clasificación de Moos y Quervain de 1948 (Tabla 3), donde dice:

Tabla 3. Clasificación de tamaño de poro. (Moos y Quervain, 1948)

% porosidad	Clasificación
<1%	Compacta
1% - 2.5%	Poco Porosa
2% - 5.5%	Ligeramente Porosa
10% - 20%	Muy Porosa
>20%	Muchos espacios de poro

Para la obtención de la distribución del tamaño del poro se utilizará un porosímetro de mercurio según el estándar (DIN 66133:1993-06 Determination of Pore Volume Distribution and Specific Surface Area of Solids by Mercury Intrusion, 1993) en el cual si la distribución oscila entre 0.1 μm y 4.0 μm se consideran microporos de 5.0 a 200 μm se consideran mesoporos de 200-2,000 μm se consideran macroporos. La ecuación utilizada para el cálculo de la distribución del radio de poro es la obtenida por (Platz, 2014).

$$rp = \frac{-2y \cos\theta}{P} \quad [3]$$

y= tensión superficial del mercurio (0.476 N/m)

θ= ángulo de humectación

P= precisión de penetración

Capacidad de absorción de agua

Las rocas al ser un material poroso presentan la capacidad de absorber agua, la capacidad de absorción de agua va ligada al tamaño de los poros capilares ya que entre mayor tamaño de poro presenten la velocidad de absorción es más alta, cuando se realizan estudios referentes a la absorción de agua de muestras de roca

es importante correlacionar los resultados obtenidos con el tamaño de poro dominante en la roca.

Conocer como es el comportamiento del agua al interior de la roca es fundamental para poder entender la durabilidad de esta, el movimiento del agua es un factor para la distribución de agentes externos como contaminantes en la roca. La cantidad máxima de absorción y saturación de agua está determinada por el sistema poroso y como este se resiste al movimiento interno del agua.

Así mismo el grado de permeabilidad que presenta un material rocoso nos permite identificar y cuantificar el grado de movilidad del agua en medios porosos lo que conlleva a la obtención del comportamiento hídrico de las muestras estudiadas.

Existen tres formas de movimiento de agua en la roca: por capilaridad, por gravedad y por adsorción.

El movimiento de agua por adsorción es aquel en el que una película de agua que se encuentra de manera superficial en la roca es adsorbida debido a la capilaridad de la misma y a la gravedad.

El movimiento por gravedad está condicionado a la presión atmosférica y puede observarse mejor en rocas con un tamaño de poro mayor ya que la capilaridad es menor y el peso de la columna de agua a la que se somete la roca aumenta.

El movimiento de agua por capilaridad es aquel en el cual el agua asciende debido a la tensión superficial generada entre la roca-líquido, la presión existente en el agua es menor que la presión atmosférica lo que hace que suba hasta saturar a la roca y generar un equilibrio hidrostático.(Benavente García, 2002)

La determinación de la absorción de agua por el método de capilaridad se da siguiendo el estándar DIN (ISO 15148:2002 - Hygrothermal Performance of Building Materials and Products — Determination of Water Absorption Coefficient by Partial Immersion, 2002).

Al realizar el estudio y análisis de adsorción de agua por capilaridad puede observarse que los primeros minutos la adsorción es mayor debido al fenómeno en el cual se llenan los poros más grandes de la roca y se expulsa el aire existente, conforme pasa el tiempo en el experimento, se ve disminuida la adsorción de agua

sin llegar a detenerse lo que nos indica que los poros más pequeños son los que ahora se están llenando de agua.

Benavente dice que estudiando el comportamiento capilar de una roca se puede entender su durabilidad ya que el coeficiente de adsorción capilar nos permite conocer el comportamiento del sistema poroso de la roca y como este es susceptible al deterioro.

Así mismo recordemos que el tamaño de poro efectivo es el parámetro más importante para llegar a un entendimiento de la durabilidad de la roca, por medio de experimentos realizados a lo largo del tiempo por diversos autores se conoce que si el tamaño del poro es menor las rocas son más propensas a degradarse por ciclos de humedad-sequedad.

Propiedades Mecánicas.

Cohesión y Resistencia a la Compresión.

Como será el comportamiento de la cantera frente a las acciones de cargas estará determinado por las fuerzas de cohesión que cada muestra presente, estas fuerzas de cohesión están ligadas a la porosidad de la roca.

La realización de un ensayo de compresión uniaxial (UCS) es de utilidad para poder conocer el comportamiento de las rocas a los esfuerzos compresivos, recordando que deben tomarse en cuenta la orientación de los planos de discontinuidad ya que en los materiales anisótropos las propiedades cohesivas dependen de la dirección en que son medidos (Figura 4).

Según la teoría de Jaeger de 1960 sobre la influencia de la resistencia de las discontinuidades menciona que cuando hablamos de resistencia de rocas tipo anisotrópicas las variaciones de resistencia van a depender del ángulo de aplicación de la fuerza con relación a los planos de discontinuidad (Alencar, 2014).

La porosidad también es un factor determinante en la resistencia a la compresión de los materiales ya que a mayor porosidad menor resistencia a la rotura esto, explica Benavente, es por dos razones los poros reducen el área de la sección mecánicamente útil y así mismo actúan como concentradores de tensiones, existe la posibilidad que las muestras sometidas a ensayos de compresión presenten micro fisuras las cuales al estar sometidas a condiciones de tensión aplicada se

propaguen. Cuando una grieta se propaga se libera energía de manera elástica, la tensión aplicada puede estar concentrada en una fisura y puede ocasionar una fractura puntual y determinada, lo que se conoce como concentradores de tensiones. La manera en que la rotura va a presentarse puede ser dúctil o frágil esto depende de su capacidad para deformarse de manera plástica, en la rotura dúctil los materiales absorben gran cantidad de energía previa a la falla y en la rotura frágil no existe deformación de tipo plástico previo a la falla (Benavente, 2007).

En los materiales anisótropos el tipo de rotura que se presenta es la frágil ya que existen dentro de este tipo de roca fracturas microscópicas que cuando son sometidas a estrés producen una fractura macroscópica, cuando una roca es altamente porosa también puede darse el fenómeno de la fragmentación ya que las concentraciones de tensiones están presentes en toda la roca.

Finalmente se puede estimar que a mayor resistencia a la compresión uniaxial mayor será la durabilidad de la roca.

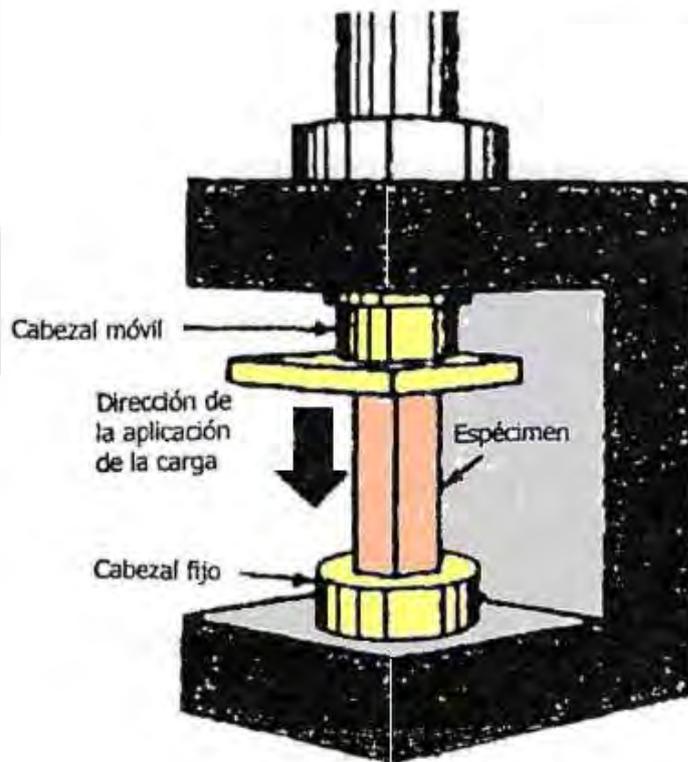


Figura 4. Ensayo de compresión uniaxial. Cantabria (2011). Ensayo de compresión (Figura). Recuperado de <https://dmt126.neocities.org/>

3.3 Canteras alteraciones y procesos de desgaste

Existen agentes que influyen en el deterioro de las rocas utilizadas en la construcción y pueden dividirse en tres factores; físicos, químicos y biológicos, conocerlos nos permitirá realizar una aproximación y un diagnóstico de las lesiones que la roca puede sufrir a lo largo de su vida útil que va desde la extracción del banco, el uso constructivo, hasta su estado actual.

Las rocas que se utilizan en la construcción tienden a sufrir alteraciones que muchas veces se manifiestan en el exterior a manera de variaciones de color, dureza o resistencia, a estas alteraciones naturales se les conoce con el nombre de meteorización y vienen condicionadas por factores atmosféricos e intemperismo lo que con el paso de los años conlleva a la degradación de sus propiedades físicas. Las rocas tienen un equilibrio que está condicionado a presiones y temperatura propios de la zona donde se encuentran, cuando estas rocas se utilizan para la construcción sus condiciones cambian por factores como contaminación o diferencia de cargas; por ejemplo, una cantera que se utiliza como roca estructural está sometida a una presión de carga diferente de aquella roca que se utiliza como ornamentación. Otros factores como los agentes biológicos dañinos son distintos a los que se expone la roca en su ambiente natural, teóricamente el proceso de degradación natural de la roca es un proceso el cual dura muchos años y aunque en ambientes contaminados, este deterioro se ve acelerado, para que la degradación pueda ser notoria a simple vista también es necesario que pasen un par de años. (F. Alonso Rodríguez et al., 2006)

Temperatura

Los cambios de temperatura a los cuales se exponga una roca ocasionaran con el paso del tiempo su deterioro, cuando una roca se calienta se expande y cuando regresa a su temperatura habitual el esfuerzo que presento cuando estaba con una temperatura elevada puede permanecer, según Siegesmund (2011) si se someten las muestras a ciclos que oscilen con una temperatura entre 20°C-90°C se producirá un daño en la roca, lo que conllevará una pérdida en la propiedad cohesiva del material que se verá reflejada en pérdida de material por medio de descamaciones o fragmentaciones.

Biodeterioro

Las bacterias que se encuentran presente en las rocas se alimentan de material inorgánico lo que puede provocar la aparición de eflorescencias, óxido (para materiales ferrosos) o que los productos de desecho de dichos microorganismos sean ácidos para la roca. También existe la aparición de vida vegetal (plantas) en las rocas lo que expone a esta a presiones por parte de las raíces, generación de humedad y proliferación de hongos y musgo.

Procesos mecánicos y químicos

Para los procesos mecánicos se deben considerar las expansiones y contracciones que puedan generarse en la roca y den lugar a un cambio de volumen del material lo que detona en deterioros como la fragmentación, la disgregación o la deformación.

En los procesos químicos se lleva a cabo una reacción en los componentes minerales que se da en presencia de fluidos estas pueden ser: disolución, oxidación, carbonatación, sulfatación, etc.

Los procesos químicos que pueden ocasionar que la cantera utilizada en construcciones sufra desgaste generalmente es la lluvia ácida y la contaminación, los químicos, ácidos y el nivel de pH existente en estos ocasionan una disolución mineral en la roca, el ion hidrógeno presente en el agua desencadena reacciones químicas que provocan que la roca se deteriore, y estas reacciones por lo general desencadenan la aparición de cationes como sodio, potasio, magnesio y calcio. (Siegesmund & Snethlage, 2011)

Reacciones de disolución mineral

Las reacciones de disolución mineral van relacionadas a la exposición al agua de las rocas ya que el hidrógeno ocasiona la disolución mineral en la roca y por consecuencia el deterioro.

Para que estas reacciones puedan generarse se debe considerar el tiempo de exposición, la cantidad de agua a la que la roca es sometida y el pH del agua en ocasiones es muy ácido debido a la contaminación atmosférica y esta acidez en el agua puede ocasionar alteraciones en la roca.

La cantera presenta naturalmente un buen grado de soldamiento y la matriz está bien consolidada y compactada lo que la hace un material adecuado para estar en contacto con el agua sin presentar deterioro a corto plazo.

La degradación de las rocas se puede estudiar utilizando tres metodologías:

1.- Métodos directos

Es aquel método basado en la observación directa

2.- Ensayos acelerados

Son los ensayos que simulan la respuesta de las rocas a las alteraciones, generalmente el intemperismo acelerado consiste en una experimentación mediante cristalización de sales, aunque esta degradación dista de darse de manera natural para la roca.

3.- Estimadores teóricos.

Son correlaciones entre el sistema poroso de la roca y sus propiedades mecánicas ejemplo entre mayor su resistencia a la compresión y velocidad de propagación de ondas ultrasónicas mayor su durabilidad, estos estimadores son más rápidos y precisos ya que se basan en la caracterización del material.

Esto se presenta resumido de manera gráfica en la figura 5.

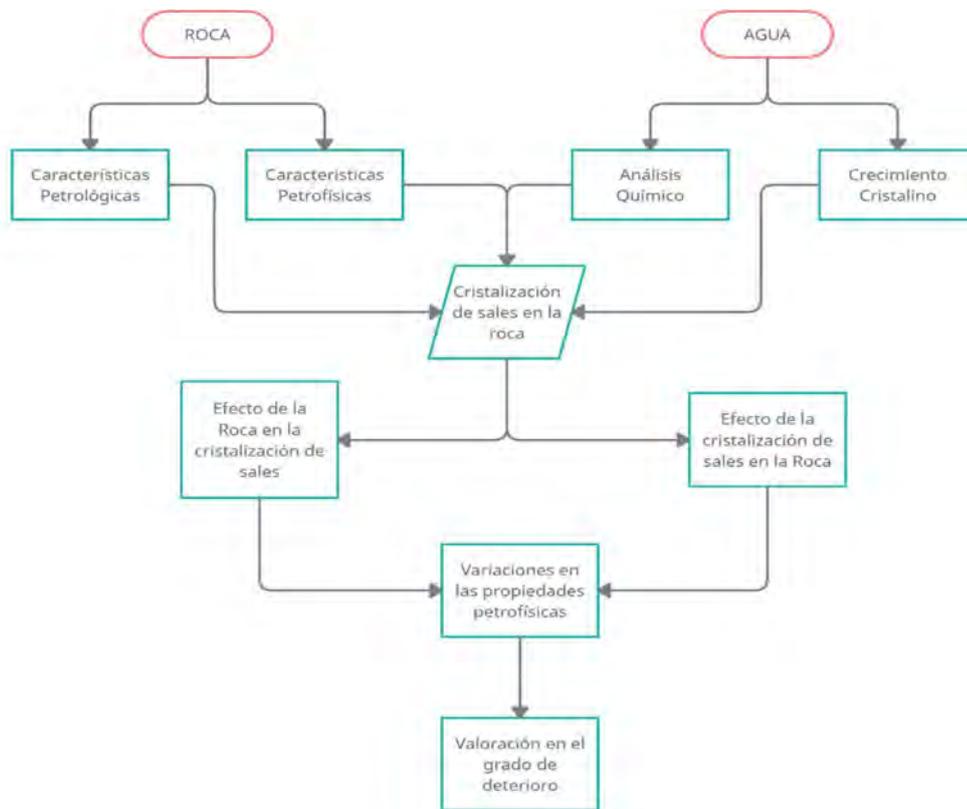


Figura 5. Método de análisis de las alteraciones en la roca. Modificado de (Benavente García, 2002).

3.4 Cristalización de sales

El sulfato es la sal que más daño provoca en las rocas en especial las porosas.

La presión de cristalización es una variable dependiente del grado de saturación salina al que una roca se encuentre expuesta, en ambientes naturales las rocas se saturan por medio de evaporación y depende de la temperatura, humedad y los compuestos químicos que integren la solución.

Teoría de la nucleación (Nielsen, 1964).

La cristalización se lleva a cabo en dos etapas la primera es aquella en la que el cristal se forma y la segunda es donde este crece a este crecimiento de cristal se le conoce como nucleación y lo que impulsa estas etapas es la sobresaturación.

La saturación se define como un estado de equilibrio termodinámico esto quiere decir que la saturación de una sustancia varía en función de la temperatura, esto puede verse representado en el diagrama de Miers e Isaac (Figura 6) lo cual nos

permite observar las 3 regiones que son estable (*stable*), metaestable (*metastable*) e inestable (*labile*).

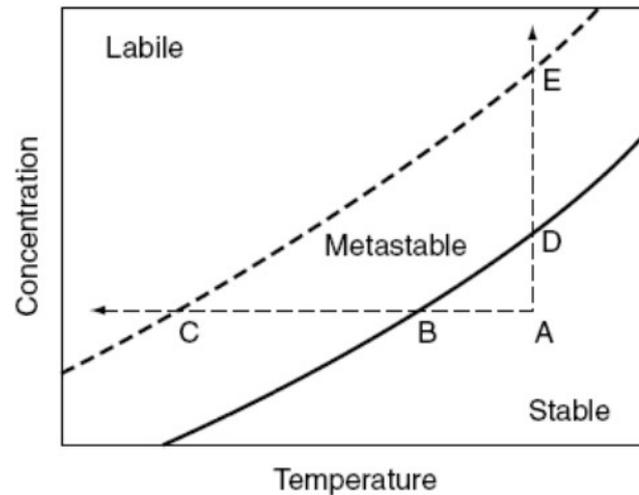


Figura 6. Diagrama de saturación-sobresaturación Miers e Isaac. (Benavente García, 2002).

La primera región la región estable nos habla de una zona instaurada donde por ende el proceso de cristalización no puede llevarse a cabo, la segunda zona es la metaestable que es una solución que presenta sobresaturación esto quiere decir que contiene mayor cantidad de soluto en la disolución que la que permite su equilibrio termodinámico (curva de saturación), y por último la zona inestable se define igualmente como una zona sobresaturada pero con un porcentaje muy alto de que la nucleación pueda presentarse esto se deberá a una mayor concentración de saturación y a una mayor temperatura.

Que una mezcla se encuentre sobresaturada no significa que el proceso de cristalización se lleve a cabo ya que para la formación de los minerales existe otro factor aparte de la saturación que es necesario y esto es que la disolución debe ser capaz de nuclearse y crecer ósea que aparezcan núcleos (átomos, iones) que sirvan para el desarrollo de la cristalización.(Nielsen, 1964)

Para el caso de la cristalización de sales utilizando una mezcla de Na_2SO_4 al 10% de saturación la solubilidad de este elemento es independiente de la temperatura por lo que se logrará un estado de sobresaturación al evaporarse parte del disolvente en este caso el agua.

Nucleación homogénea.

Si la nucleación (aparición de cristales) se lleva a cabo sin la intervención de ninguna otra partícula ajena en la solución, se denomina nucleación homogénea.

Nucleación heterogénea.

La nucleación heterogénea se da en presencia de partículas extrañas o impurezas en la mezcla y por ende puede verse detenida o catalizada (Mullin, 1993).

Esto nos indica teóricamente que el uso de aguas contaminadas detendría la nucleación y los procesos de cristalización de sal dentro de las rocas, lo que conllevaría a que el desgaste se da por factores distintos a la cristalización.

Fases de la cristalización de sales (Anhidra e Hidratada)

Existen dos fases consideradas estables en el proceso de cristalización la primera la fase anhidra o seca (thenardita) y la segunda la fase hidratada (mirabilita), estas fases al ser estables dependen de factores externos como la humedad, temperatura y la fuerza iónica de la salmuera (grado de saturación en la solución preparada).

La temperatura es un factor importante para el grado de saturación en la fase hidratada y para la fase anhidra es estable con una temperatura de 32°C, si cambiamos el factor temperatura y saturación la estabilidad de estas fases se ve afectada ocasionando así cambios en la roca.

La presión de cristalización es el que genera daños en los materiales porosos esto está correlacionado a la saturación de la salmuera en la solución, la energía del cristal que precipita y al tamaño del poro.

Para poder precipitar un mineral la humedad relativa ambiental tiene que ser menos que la humedad relativa en equilibrio (delicuescencia).

La delicuescencia de la ignimbrita cantera permite que esta se sature con la humedad ambiental provocando sobresaturación y posteriormente secado y el crecimiento de cristales. (Benavente García, 2002).

No se utiliza en el presente estudio debido a que las muestras buscan simular situaciones de sumersión total de las rocas debido a condiciones medioambientales diferentes como lo es inundación.

Etapas en el proceso de cristalización de sales

Se pueden observar tres etapas en el proceso de cristalización de sales, la primera es la etapa de inmersión en la cual las muestras se sumergen totalmente en solución saturada la duración del tiempo de inmersión depende de la normatividad utilizada pero el mínimo es de 4 horas, la segunda etapa es el proceso de secado de las muestras aquí es donde observaremos el proceso generado por la presión de cristalización y la destrucción paulatina de las muestras de roca, al principio durante los primeros ciclos el peso de las rocas presenta una tendencia a ir en aumento esto debido a la saturación de los poros con sulfato, posteriormente el peso irá en decremento debido al daño provocado con el experimento.

La última etapa que es la etapa de enfriamiento a temperatura ambiente tiene una duración aproximada de 6 horas y se debe tener en consideración la temperatura ambiental y de ser posible la humedad relativa del ambiente ya que como se mencionó anteriormente estos dos son factores fundamentales para los procesos de cristalización. (Benavente García, 2002)

3.5 Agua

Higroscopía.

El agua (H_2O) es el disolvente natural por excelencia, el agua puede generar una reacción al entrar en contacto con los materiales de la roca, esto lo observamos en la estabilización de fases hidratadas o anhidras (Benavente et al., 2008) en el estudio realizado por (Grossi & Esbert, 1994) se consideran como las sales solubles que con más frecuencia pueden estar en monumentos son los sulfatos (SO_3), cloruros (Cl), carbonatos (CO_3) (alcalinidad del agua) y nitratos (NO_3^-).

Alcalinidad. (Carbonatos)

La alcalinidad es la capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones. El agua contiene de manera natural bicarbonatos y carbonatos los cuales son iones propios del agua como el sodio (SO_3), magnesio (Mg) y el calcio (Ca). La alcalinidad se enuncia en ppm (partes por millón) de carbonato de calcio ($CaCO_3$), la alcalinidad es considerada con valores altos cuando es mayor a 150 ppm ($CaCO_3$), y baja cuando sus concentraciones se encuentran por debajo de 40 ppm (Hach Lange, 2017).

pH

La determinación del potencial de hidrógeno en el agua pH, indica la concentración del ion hidronio (H_2O^+) en una solución, este parámetro nos indica la intensidad de un ácido.

Sulfato (salinidad)

La determinación del contenido de sal en el agua requiere de un análisis químico que conlleva una cantidad de tiempo importante, se puede substituir con un método indirecto como lo es su capacidad conductiva, el ion de sodio (Na) es el catión más abundante en agua con un índice alto de sulfato, mientras que el ion cloruro (Cl) es el anión principal.

Reacciones que provocan disolución mineral en la roca

El aumento o disminución de los iones de hidrógeno (H) de los componentes minerales de la roca ocasiona su disolución o su deterioro, que se define como meteorización de la roca esto puede darse por cambios químicos dentro de la misma lo cual ocasiona que por medio de la hidrólisis el agua meteorice químicamente, libere cationes dentro de la roca y por ende se generen ácidos los cuales dañan al material. (Siegesmund & Snethlage, 2011).

Disolución mineral por lluvia ácida.

Recordemos que un catión es un ion con carga eléctrica positiva, cuando se presenta un ataque ácido en la roca este origina que los cationes disuelvan los silicatos de los minerales originales, esto conlleva la formación de nuevos compuestos minerales, los más comunes son sodio, potasio, magnesio y sales de calcio, los cuales son los principales cationes encontrados en el agua natural.

Según (Wedekind et al., 2013) tres son los factores que determinan la velocidad de las reacciones de una disolución mineral:

1. La cantidad y el tiempo del contacto del líquido con la superficie del mineral
2. La solubilidad del mineral
3. El pH del agua

La solubilidad del mineral generalmente es muy baja en el agua común y en la naturaleza se necesitan siglos de ciclos de saturación y secado con agua procedente de la lluvia o de la infiltración para que las rocas presenten daños

significativos, pero que pasa con aquellas edificaciones que se ven sometidas constantemente con aguas de un pH de 4 como lo tiene la lluvia ácida, existe una regla general que nos indica que la solubilidad de un mineral aumenta al disminuir el contenido de silicatos y al aumentar el contenido de calcio y magnesio. Así mismo esta solubilidad se ve alterada en el momento que los minerales se encuentran expuestos a soluciones con pH bajos, estas reacciones de disolución mineral causan una pérdida de cohesión de los materiales de la roca.

Nitratos (NO_3) y sulfatos (SO_4) son los principales productos de reacción de la deposición ácida a las piedras de construcción (Siegesmund & Snethlage, 2011).

Es importante analizar el agua al comenzar la experimentación con lluvia ácida y al finalizar cierto número de ciclos ya que los cambios en la composición nos indicarán las interacciones con la piedra, por ejemplo, una concentración más alta de calcio podría indicarnos una disolución de calcita en la roca, aunque también puede darse el caso de que los minerales de la roca neutralicen el pH de la lluvia ácida.

Tipos de degradación por agua en las rocas.

La cantidad de agua encontrada en la parte interna de la roca condicionará su degradación química (disolución, precipitación, hidrólisis, oxidación, etc.)

Se considera estudiar los tipos de sales más comunes en diferentes formas hidratadas que afectan a las rocas de construcción, entre las cuales se destacan:

- Na_2SO_4 sulfato de sodio
- MgSO_4 sulfato de magnesio
- Na_2CO_3 carbonato de sodio

El estudio de la existencia de estos elementos en las muestras está basado en (Siegesmund & Snethlage, 2011) el cual menciona que estas sales aunque son comunes pueden existir dentro de la roca provenientes de la humedad relativa ambiental.

CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

4.1 Técnicas de Recolección de Datos

La investigación estará basada en un método descriptivo con muestreo de tipo cualitativo para posteriormente con dicha información realizar un análisis correlacional.

Se considera como tipo descriptivo porque, se definirán y medirán datos obtenidos de pruebas de laboratorio a diferentes materiales pétreos, que se someterán a pruebas de saturación de agua y posterior desecación, así mismo se realizarán análisis para determinar las características físico - químicas de los diferentes tipos de agua.

Con los resultados obtenidos se puede pasar a la fase correlacional de la investigación ya que estos datos nos permitirán saber por qué las piedras de las construcciones pueden tener una tendencia a degradarse en mayor o menor medida, dependiendo del ambiente en el que se encuentren, y como es que la saturación de agua pudiera o no afectar sus características, o si se ve afectado en mayor o menor medida su proceso de desgaste en comparación con los elementos que se encuentran en condiciones sin presencia de agua. Con esta información podríamos tener un pronóstico del comportamiento de las piedras en edificaciones patrimoniales, que se encuentren sometidas a procesos constantes de saturación y desecación debido a condiciones diversas entre ellas ambientales, desastres naturales, alteración del agua de lluvia por efecto de emisiones contaminantes, obras de infraestructura hidráulica, contaminación de afluentes, colapso en sistemas de drenaje, entre otras.

4.2 Variables Operacionales

A continuación, se presenta una matriz de operacionalización de variables (Tabla 4) en la cual se colocarán aquellas características que pueden sufrir cambios a lo largo del proceso experimental con la finalidad de distinguirlas y poder realizar un correcto análisis de estas.

Se tratan de variables que nos presentarán características cualitativas de las rocas.

Tabla 4. Variables Operacionales. Elaboración propia.

Variable	Concepto	Dimensión	Indicador	Unidad
Cantera Hermosa de Aguascalientes	Es una roca proveniente de flujos piroclásticos, compuestos principalmente por material silíceo.	Variantes de color	Cantera Roja	RQ
			Cantera Verde	GQ
			Cantera Amarilla	YQ
Tipos de Agua	La contaminación del agua conlleva un cambio en su estructura químico-biológica original	Niveles de contaminación	Agua Destilada	DW
			Agua de lluvia	RW
			Agua simulando lluvia ácida	ARW
			Agua Tratada	TW
			Agua sulfato Na ₂ SO ₄ al 10%	SW
Petrografía de las Rocas	En geología se encarga de la descripción y clasificación de las rocas según su composición mineral.	Descripción macroscópica de las muestras	Color	
			Textura	
			Matriz	
			Grado de Soldamiento	
Petrofísica de las Rocas	Se encarga de la descripción y clasificación de las rocas por medio de la distribución, tamaño y forma de los poros.	Metodología utilizada por el Instituto Alemán de Normalización DIN	Peso seco	gr
			Peso Sumergido	gr
			Peso Húmedo	gr
			Porosidad	%
			Tamaño promedio de poro	µm
			Densidad de Matriz	g/cm ³
			Densidad Aparente (Bulk Density)	g/cm ³
			Absorción al vacío	%
			Absorción de Agua Prueba Karsten	ml/min
Desgaste y deterioro de las rocas en medios acuosos	Análisis de los patrones de desgaste que puedan presentarse debido a la exposición de la cantera al agua.	Ciclos de saturación y desecación	Pesos pre ciclos	gr
			Pesos post ciclos	gr
Propiedades mecánicas de la cantera	Es el comportamiento de la roca frente a fuerzas de carga que se ejerce sobre ella.	Prueba de compresión simple	Resistencia a la compresión en muestras inalteradas	Mpa
			Resistencia a la compresión en muestras post ciclos	Mpa

4.3 Determinación del tamaño de la muestra

Desde el punto de vista de la probabilidad el tamaño muestral tendrá un carácter dirigido, según lo planteado en la operacionalización de variables (Sampieri et al., 2014).

Para determinar el número de muestras de la presente investigación se siguió la metodología de Sampieri que sugiere tomar en cuenta 3 factores:

- 1.- El número de casos que se pueden manejar (en este caso rocas),
- 2.- Cuánto se comprende del fenómeno de estudio y, por último,
- 3.- La naturaleza del fenómeno de análisis esto quiere decir el tiempo que toma realizar los experimentos y la complejidad de los mismos.

Bajo las condiciones imprevistas debido a la pandemia por COVID-19 de 2020 en el cual se tuvo que realizar la campaña experimental desde un laboratorio improvisado en casa donde no se contaban con todos los recursos necesarios para tener un número muestral amplio se optó por utilizar un total de 75 rocas (N) que nos permitiría observar los planteamientos desarrollados en los objetivos de la presente tesis, las muestras (n) se dividieron de acuerdo con los siguientes diagramas (Figuras 7,8,9) :

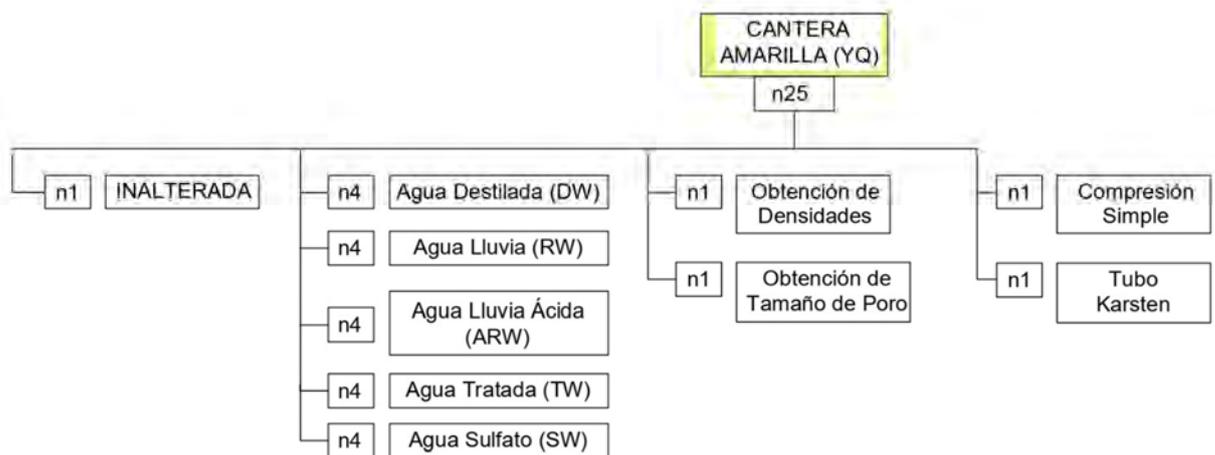


Figura 7. Variables Operacionales Cantera Amarilla. Elaboración propia

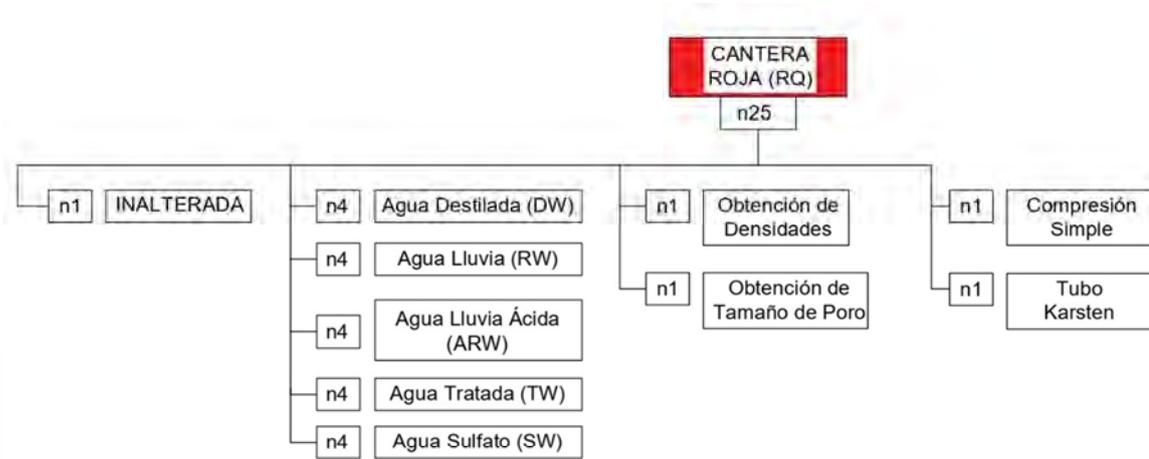


Figura 8. Variables Operacionales Cantera Roja. Elaboración propia.

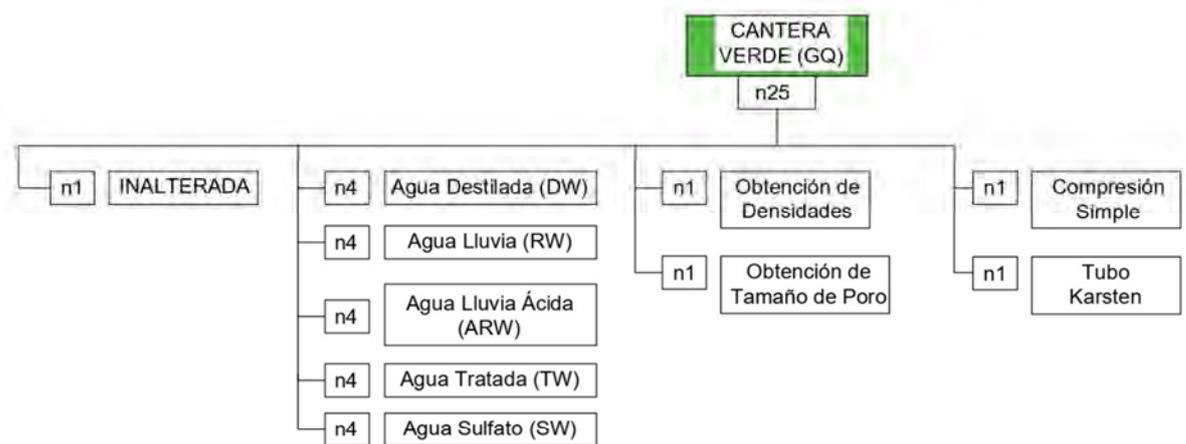


Figura 9. Variables Operacionales Cantera Verde. Elaboración propia.

El muestreo se puede clasificar como diversa o de máxima variación (Sampieri et al., 2014) ya que las perspectivas planteadas permitirán localizar diferencias o similitudes en el comportamiento de las rocas así como los patrones y particularidades que presenten con la experimentación.

4.4 Diseño del experimento

4.4.1 Obtención de las muestras

a. Obtención de la Cantera

La cantera fue extraída del banco (Figura 11) ubicado en la localidad de Clavellinas, municipio de Asientos en el estado de Aguascalientes México (Figura 10). Se obtuvieron muestras de Cantera Hermosa con 3 diferentes tonalidades, rosa, amarilla y verde.

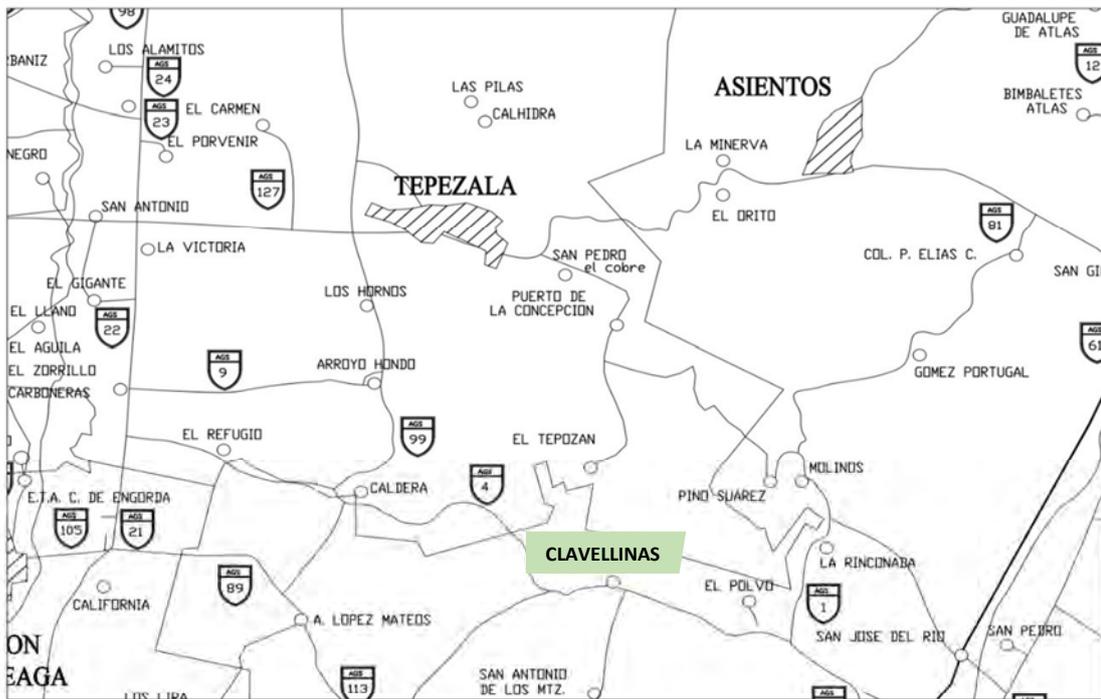


Figura 10. Ubicación de la localidad de Clavellinas. INEGI (2014).



Figura 11. Banco de cantera y bloque extraído de la localidad de Clavellinas. Elaboración propia.

b. Obtención de Probetas

Se obtuvieron 75 probetas de las cuales 25 son de cantera amarilla, 25 de cantera rosa y 25 de cantera verde todas se cortaron de forma cúbica con medidas de 6.5 x 6.5 cms. por lado (Figura 12), según la norma establecida por el Instituto Alemán de Normatividad D.I.N. (DIN EN 772-4: Methods of Test for Masonry Units- Part 4: Determination of Density and Bulk Density and Total Porosity of Bricks Made of Natural Stone, 1998), estas longitudes varían por milímetros en algunas muestras esto, debido a la preparación de las mismas (Platz, 2014).

Así mismo estas muestras se colocó la nomenclatura “X”, “Y” y “Z” para cada dirección en la estratificación de la roca.



Figura 12. Probetas obtenidas de izquierda a derecha: cantera amarilla, rosa y verde. Elaboración propia.

c. Obtención de agua

Las aguas que se utilizarán en esta campaña serán agua destilada, agua de lluvia obtenida por recolección durante los meses de mayo – julio de 2020 en el estado de Aguascalientes, agua con saturación Na_2SO_4 al 10% realizada en laboratorio, agua simulando lluvia ácida, para la creación artificial de este tipo de agua se basó en el método utilizado en el artículo titulado “*Experimental investigations of simulated acid rain affected Brahmi*” (Behera et al., 2014), en el cual se utilizan 700 ml. de agua destilada y una gota (0.1 ml.) de H_2SO_4 al 10%, esto para obtener un pH de 4 en el agua, dicho pH se midió con un pH-metro. Finalmente se obtuvieron muestras de agua tratada nivel doméstico de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA).

4.4.2 Método de tratamiento de agua en la planta tratadora.

Para el tratamiento de las aguas residuales utilizadas se sigue un método de biorreactor de lodos activados, se trata de un proceso biológico en el cual el tejido celular que es más denso que el agua es eliminado por procesos de decantación. Este proceso se define como un método aerobio lo que significa que en el tratamiento se tiene presencia de oxígeno donde microorganismos contenidos en un reactor se encargan de destruir la materia orgánica presente en el agua. La variedad de microorganismos presentes en el sistema de lodos activados permite remover la materia orgánica y elementos como nitrógeno (N_2) y fósforo (P) del agua a tratar.

El proceso es el siguiente (Figura 13):

Primero el agua residual pasa a través de un sistema de rejillas que detienen materia sólida como basura, el segundo paso es el tránsito del agua por una trampa de grasas también llamado desarenador esta trampa eliminará aceite, grasas y aquellas sustancias con menor densidad que el agua y al flotar quedarán atrapadas en el primer compartimiento, el tercer paso en el “método de tratamiento de lodos activados, es el tanque de aeración en este compartimiento los difusores de burbuja fina insuflan aire en el agua residual con el objetivo que las bacterias aeróbicas degraden la materia orgánica contaminante.” (Varila, J, & Díaz, 2008,p.22). Esto

quiere decir que el proceso remueve DBO, DQO y sólidos suspendidos por un proceso de oxidación, el proceso de degradación que realizan las bacterias aeróbicas tiene como subproducto dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O) es por esto que se elimina la generación de malos olores. “El objetivo del clarificador es separar por el método de sedimentación el agua tratada del lodo, esta agua recircula al tanque de aeración y el exceso se retira periódicamente al tanque de lodos para dar un proceso adecuado. Cuando el agua que viene del clarificador llega al área de cloración se utiliza un clorinador para destruir las bacterias patógenas, así el agua está lista para ser reutilizada”. (Varila, J, & Díaz, 2008, p.22)

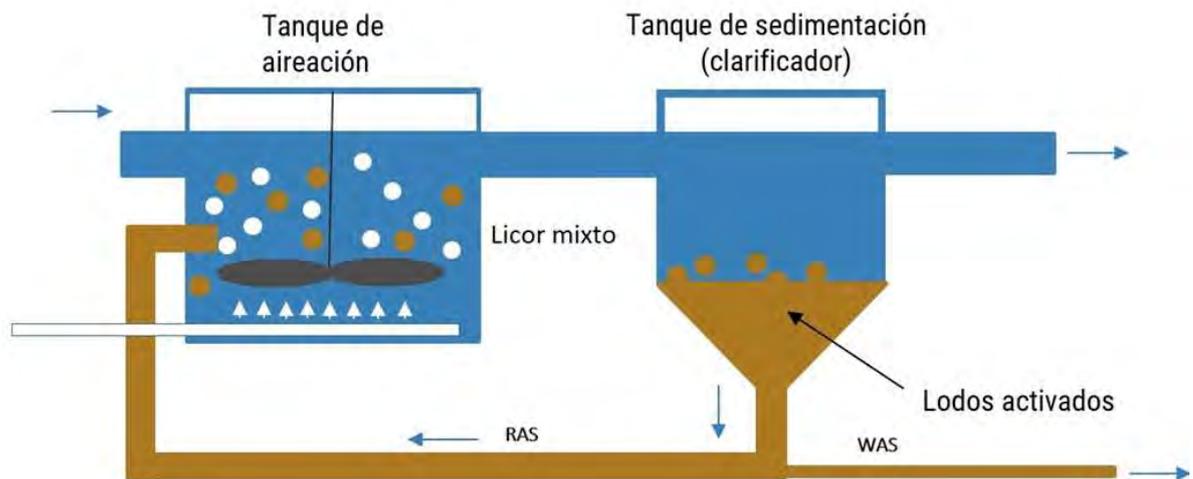


Figura 13. Proceso de sistema con lodos activados
Sela, G. (2019). Sistema convencional de lodos activados (Figura). Recuperado de <https://cropaia.com/es/blog/lodos-activados/>

4.4.3 Características petrofísicas de las rocas

Se deben obtener las características petrofísicas de las rocas que son: densidad aparente, densidad de matriz y porosidad, ya que el tamaño y la distribución de los espacios vacíos en la roca condiciona su resistencia a las presiones que generan las sales durante los procesos de cristalización (R.J. Schaffer, 2015).

Para este propósito las muestras deben colocarse en el horno de laboratorio (Figura 14) con una temperatura constante que se determinó entre el rango de 60-90°C por un periodo de 18 horas (R.I.L.E.M., 1980).



Figura 14. Horno utilizado para el secado de las rocas. Elaboración propia.

Posteriormente estas muestras en estado seco se pesan obteniendo así su “masa seca” M_{dry} , a continuación, debe obtenerse el “peso húmedo” o “masa saturada” M_{sat} para esto, las muestras se colocan en una cámara de vacío (Figura 15) para extraer el aire de los poros internos de la roca por un lapso mínimo de 12 horas de vacío, posteriormente se fuerza la inducción de agua (Figura 16), las rocas se sumergen en agua destilada por un lapso de 24 a 48 horas y se pesan bajo condiciones completamente saturadas, así se obtiene el peso húmedo.

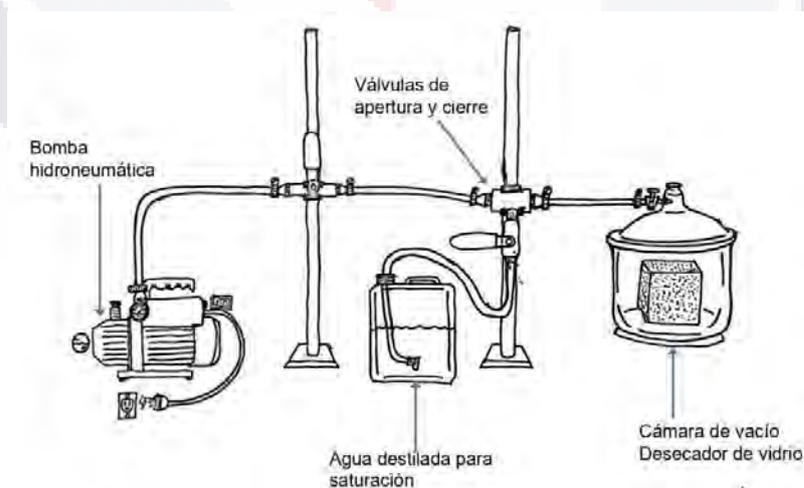


Figura 15. Cámara de vacío. Modificado de Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí



Figura 16. Extracción de aire y posterior saturación con agua. Elaboración propia

Para determinar el peso sumergido de las muestras (Figura 17), se debe obtener el peso de la roca totalmente sumergida (M_{sub}). Lo anterior nos permitirá determinar el porcentaje de porosidad, densidad de la matriz, densidad aparente y el porcentaje de absorción al vacío de las muestras. Para graficar los resultados obtenidos y calcular la porosidad en %, la densidad de la matriz, la densidad aparente (*bulk density*) en g/cm³ y la absorción de agua al vacío se utilizó una hoja de cálculo diseñada por la Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (Tablas 5 y 6).



Figura 17. Obtención de peso seco (der.) y peso sumergido (izq.). Elaboración propia.

Tabla 5. Obtención de densidades cantera amarilla. Elaboración propia.

MUESTRA	Peso Seco [gr]	Peso Sumergido (gr)	Peso Húmedo [gr]	Porosidad [%]	Densidad de Matriz (g/cm ³)	Densidad Aparente (Bulk)(g/cm ³)	Absorción al vacío [Gew.%]
YQ-DW1	441.16	269.11	552.76	39.344	2.564	1.555	25.297
YQ-TW1	451.16	276.71	563.45	39.161	2.586	1.573	24.889
YQ-TW2	448.50	274.74	558.32	38.726	2.581	1.582	24.486
YQ-TW3	448.25	273.98	557.51	38.536	2.572	1.581	24.375
YQ-TK	452.26	276.83	565.06	39.135	2.578	1.569	24.941
MAXIMO	451.160	276.710	563.450	39.344	2.586	1.582	25.297
MINIMO	441.160	269.110	552.760	38.536	2.564	1.555	24.375
PROMEDIO	447.268	273.635	558.010	38.980	2.576	1.572	24.798

Tabla 6. Obtención de densidades cantera verde. Elaboración propia.

MUESTRA	Peso Seco [gr]	Peso Sumergido (gr)	Peso Húmedo [gr]	Porosidad [%]	Densidad de Matriz (g/cm ³)	Densidad Aparente (Bulk)(g/cm ³)	Absorción al vacío [Gew.%]
GQ-DW1	418.02	254.06	530.64	40.719	2.550	1.511	26.941
GQ-RW1	449.37	272.22	549.80	36.181	2.537	1.619	22.349
GQ-UW1	436.56	265.34	545.80	38.950	2.550	1.557	25.023
GQ-Na ₂ SO ₄ 1	460.67	279.08	556.75	34.602	2.537	1.659	20.857
GQ-TK	450.68	273.31	556.20	37.301	2.541	1.593	23.414
MAXIMO	460.670	279.080	556.750	40.719	2.550	1.659	26.941
MINIMO	418.020	254.060	530.640	34.602	2.537	1.511	20.857
PROMEDIO	441.155	267.675	545.748	37.551	2.543	1.588	23.717

Para la obtención de los datos referentes a la cantera roja se tomó una probeta y se envió para análisis en el Instituto de Geología de la UASLP ya que debido a la pandemia el laboratorio de la UAA se encontraba cerrado y fue imposible continuar con estas pruebas, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Cantera Hermosa roja

Porosidad: 26%

Densidad de matriz: 2.221 (g/cm³)

Densidad aparente: 1.643 (g/cm³)

Distribución de radio de poro.

Según (Siegesmund & Snethlage, 2011) podemos distinguir cuatro tamaños de poros en la roca: microporos, mesoporos, macroporos y poros grandes, las cuales se representan por medio de la Tabla 7:

Tabla 7. Tamaños de poro. (Siegesmund & Snethlage, 2011)

	Micropores (μm)	Mesopores (μm)	Macropores (μm)	Large pores (μm)
De Quervain (1967)	<5	5–200 (fine pores)	200–2,000 (coarse pores)	>2,000
Dubinín (1979)	0.003 to 0.0032– 0.0012 to 0.0014	0.2 to 0.4– 0.003 to 0.0032	<0.2–0.4	
IUPAC (Gregg and Sing 1982)	<0.002	0.002–0.05	>0.05	
Klopfer (1985)	<0.1	0.1–1,000 (capillary pores)	>1,000	
DIN 66131 (1993)	<0.002	0.002–0.05	>0.05	
Kodikara et al. (1999)	1 to 30		10–1,000	

Para conocer cómo es que esta porosidad se encuentra distribuida en las muestras se realiza una prueba con un porosímetro de mercurio que nos permitirá conocer su tamaño estimado, cuyo procedimiento es el siguiente:

La muestra es puesta sobre un bulbo de vidrio y este es sellado y se satura con mercurio en presurización lo que obliga al mercurio a entrar en los poros de la roca, cuando se saca el mercurio del porosímetro los macroporos son llenados hasta que se alcanza presión atmosférica con esto se determina el volumen del tamaño de los poros, posterior la roca llena de mercurio es pesada y se determina que porcentaje de microporos tiene la muestra, la máquina analiza los resultados y define la distribución del radio del poro mediante un histograma (Molina Maldonado, 2016).

4.4.4. Ensayo de penetración de agua, Tubo Karsten.

Se realizará el ensayo de penetración de agua con base en la metodología R.I.L.E.M 11.4 el cual mide la cantidad de agua absorbida por la superficie de una roca durante un periodo de tiempo definido y nos proporcionará información referente a la velocidad a la que el agua se mueve a través de los poros de las rocas, estos ensayos se realizarán en muestras inalteradas y también en muestras posteriores a 30 ciclos de saturación y desecación con los distintos tipos de agua estas mediciones, se podrán utilizar para evaluar el grado de intemperismo que sufra el

material así mismo el método de Tubo Karsten proporciona una forma de ensayo simple para medir el volumen de agua absorbido por un material dentro de un periodo de tiempo específico.

Este proceso mostrará la relación directa existente entre la estructura capilar y la distribución del tamaño de poro ya que si los poros son más pequeños tendrán una fuerza de succión de agua más elevada pero menor absorción de agua esto en inversamente proporcional si los poros son grandes. (Siegesmund y Dürrast, 2011). Este estudio tendrá correlación con los valores de porosidad y distribución de radio de poro.

Equipo.

Se utilizará un domo de 30 mm de diámetro unido a un tubo de cristal calibrado con graduación volumétrica (10 ml = 10 cm de columna de agua), este tubo se adhiere a la superficie de la roca generando un sello hermético con ayuda de adhesivo multiusos tipo plastilina (Figura 18) esto generará una unión estanca entre el domo y la roca se debe tener cuidado con la orientación de las rocas, ya que los poros afectan el nivel de absorción de estas. Se deben determinar sus ejes x, y, z previo a realizar las pruebas (Anisotropía).

La prueba comienza llenando el tubo de agua hasta la línea de 10 ml y tomando el tiempo que el agua demore en bajar 1 o 2 ml. posteriormente se deberá rellenar de nuevo hasta la marca cero para asegurar una presión constante de agua de 10 cm de columna de agua, la profundidad de penetración de agua se medirá a partir del 1er minuto del inicio de la penetración de agua. Los valores obtenidos se especifican en ml de agua por minuto (Stelzmann et al., 2015).



Figura 18. Equipo utilizado en la prueba de absorción Tubo Karsten. Elaboración propia.

4.4.5. Ensayo de compresión simple.

La resistencia de la roca a compresión se determinará por medio del ensayo de resistencia a la compresión uniaxial (UCS), este ensayo se basa en la aplicación de una fuerza (F) sobre un área determinada (A) en las probetas de cantera hasta que estas presenten una rotura debido a que se ven sometidas al esfuerzo de compresión axial máximo que pueden soportar antes de su fractura (Figura 20), este método se realiza por medio de la utilización de la máquina prensa universal (Figura 19). La resistencia se determinará mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} \quad [4]$$

La aplicación de la carga estará bajo las normas ASTM D3148, D2938 establecido por la *International Society for Rock Mechanics* "ISRM" el cual se estipula en aplicar una carga creciente entre 0,5 y 1,0 MPa/s.

Esto permitirá determinar el criterio de rotura y como es el comportamiento mecánico de las muestras, así se puede decir que la prueba UCS nos permite definir la resistencia de la matriz de la roca (Feijoo, 2020).

Las pruebas se realizarán en probetas de todos los colores en dos fases de la experimentación, esto será en las muestras previas a los procesos de sumersión y desecación y posterior al cumplimiento de 30 ciclos esto con la finalidad de realizar una comparativa entre la fuerza necesaria para provocar su rotura pre y post ciclos y determinar si estas tienen relación con el sometimiento de las rocas a la contaminación de las aguas.

Los resultados de resistencia a la compresión obtenidos por este experimento nos permitirán también clasificar las rocas según su resistencia, basándonos en el parámetro establecido por la ISRM (Tabla 8).

Tabla 8. Clasificación de las rocas basados en su resistencia a la compresión según la ISRM. (Feijoo, 2020).

Descripción	Resistencia a la compresión (MPa)
Extremadamente blanda	<1
Muy blanda	1 - 5
Blanda	5 - 25
Moderadamente blanda	25 - 50
Dura	50 - 100
Muy dura	100 - 250
Extremadamente dura	250

El procedimiento se realizará siguiendo los siguientes criterios:

- 1.- Muestras heterogéneas de forma cúbica y medidas de 6.5 x 6.5 x 6.5 cms. x lado.
- 2.- Se identificaron las rocas en sus planos X, Y, Z.
- 3.- Las pruebas se realizaron de manera perpendicular a los planos de discontinuidad de las probetas.
- 4.- Se coloca la muestra de manera que el pistón de la prensa se mantenga paralelo a las caras transversales del cubo.
- 5.- Se mide la presión a la cual es sometida la roca esto a través de un manómetro que se encuentra conectado a la prensa hidráulica, en el momento del fallo de la roca se indicará la medición obtenida.



Figura 19. Prensa Universal. Laboratorio de materiales UAA.



Figura 20. Cantera Amarilla (izq) ensayo de compresión, Cantera Roja (centro) ensayo de compresión, Cantera Verde (der) ensayo de compresión. Elaboración propia.

4.4.6 Propiedades Químicas del agua

Se realizarán pruebas para determinar la cantidad de pH, cloruros (Cl), carbonatos (CO_3), sulfatos (SO_4) y nitratos (NO_3) en las muestras de agua todo ello previo a los ciclos de sumersión y desecación. Dentro del proceso de diseño del experimento en un inicio, se tenía planeado realizar estas pruebas al finalizar 30 ciclos de sumersión-desecación para cada color de roca y cada tipo de agua,

lamentablemente debido a las condiciones presentadas por la pandemia, estos últimos experimentos fueron imposibles de realizar.

La experimentación de las muestras de agua previa a los ciclos se realizó en las instalaciones de la Comisión Ciudadana de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Aguascalientes (CCPAMA) (Figura 21).



Figura 21. Estudios químicos del agua realizados en CCPAMA. Elaboración propia.

Determinación de pH

El pH es una medida que nos permite conocer el grado de acidez de una disolución con una escala logarítmica que va del 0 al 14 (Figura 22) donde 1 es el valor más ácido y el 14 el valor más básico, el valor 7 se considera neutro.

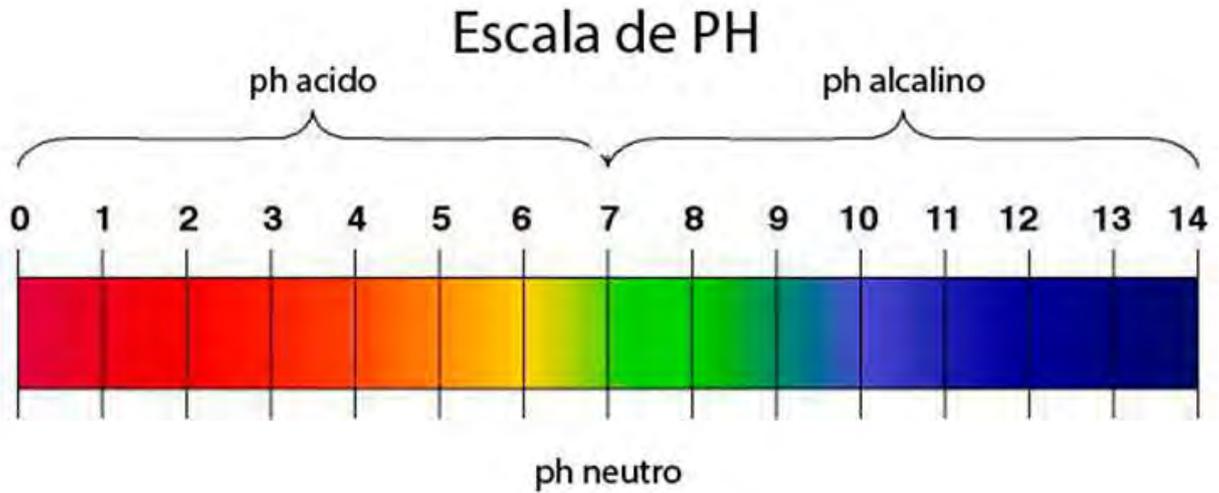


Figura 22. Escala de pH. Nd. Escala de pH (Figura). Recuperado de <https://www.experimentoscientificos.es>

El pH está relacionado con los equilibrios químicos que se dan en el agua, la concentración de protones en el agua va a determinar que se puedan llevar a cabo ciertas reacciones químicas, la forma en que se determinó el pH de las muestras se determinó con un potenciómetro de mesa o pH-metro previamente calibrado, las aguas naturalmente presentan un pH entre 6 y 9 (Hach Lange, 2017).

Este pH-metro funciona con un electrodo que es selectivo a los protones y nos determina su concentración en el agua.

Se colocan 50 ml de la muestra de agua y mediante el uso del equipo se determina el pH correspondiente.

Determinación de cloruros.

Para la determinación de cloruros totales se siguió la norma mexicana NMX-AA-073-SCFI-2001, (ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE CLORUROS TOTALES EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA, 2001) en la cual se utiliza el método de Mohr mediante la reacción del cloruro (Cl) con plata (Ag) formando un precipitado de cromato de plata (Ag_2CrO_4) que nos indicará la presencia de cloruros en el agua, cuando se consumen los cloruros en el agua y se adicionan gotas de nitrato de plata ($AgNO_3$) reaccionará con los iones cromatos (K_2CrO_4) y se formará el cromato de plata

apareciendo en forma de precipitado color anaranjado, aquí se da por terminada la valoración.

Para esta determinación se utilizará solución de nitrato de plata (AgNO₃), solución de dicromato potásico (K₂Cr₂O₇) al 5%, solución de ácido acético (CH₃COOH) y agua destilada (H₂O).

Medimos 10 ml de nuestra muestra de agua, después a esto se le añaden 50 ml de agua destilada y se agregan 3 gotas del indicador cromato potásico y se comprueba que el pH de la muestra este entre 6,3 y 10,5 si el pH llega a ser menor a 6,3 se alcalinizará con carbonato sódico (Na₂CO₃) y si el pH es mayor a 10,5 se acidificará con ácido acético (C₂H₄O₂).

Se coloca en una bureta nitrato de plata 0,1 normal y se empieza a valorar añadiendo gota a gota a nuestra agua de muestreo previamente preparada, cuando aparece el precipitado de color anaranjado dejamos de añadir gotas de nitrato de plata y anotamos el volumen de nitrato de plata empleado.

Para calcular la concentración de iones cloruro se aplicará la siguiente fórmula:

$$CL = \frac{(V * N * f)}{V \text{ muestra}} \quad [5]$$

V= Volumen de nitrato de plata utilizado (ml)

N= Normalidad del nitrato de plata

F= factor de corrección

V muestra = volumen de la muestra (ml)

Determinación de alcalinidad / carbonatos.

La alcalinidad en el agua tiene la capacidad de neutralizar los ácidos esto quiere decir disminuir el pH de esta a un valor aproximado de 4.5, la determinación química de alcalinidad en las aguas naturales se determina por el sistema carbónico-carbonato, este sistema define unos valores de pH característicos que establecen la especie química carbonatada que predomina



HCO₃ Bicarbonato

CO₃ Trióxido de carbono

OH⁻ Ion Hidroxilo

H⁺ Hidrógeno

Para la determinación de alcalinidad se siguió la norma mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001 (ANÁLISIS DE AGUA-DETERMINACIÓN DE ACIDEZ Y ALCALINIDAD EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS-MÉTODO DE PRUEBA, 2001), que determina la alcalinidad por el principio de neutralización utilizando ácido sulfúrico (H₂SO₄) el cual dona los protones que necesita la titulación. La titulación es aquel método de análisis que nos permitirá determinar la concentración de una solución, para este experimento utiliza un indicador coloreado con anaranjado de metilos para indicar el punto final de la titulación.

La alcalinidad de una muestra se determina mediante un volumen de ácido estándar en este caso ácido sulfúrico requerido para titular una porción de la muestra de agua con un pH de 4.5, este valor se estableció como punto final de la valoración y corresponde con los puntos de equivalencia seleccionados para los tres componentes principales de la alcalinidad: bicarbonato (NaHCO₃), carbonato (CO₃) e hidróxido (OH⁻) presentes en la muestra.

El método utilizó ácido sulfúrico 0,02 normal, solución de carbonato de sodio (NaCO₃) 0,05 normal de esta solución se debe conocer exactamente la cantidad de carbonato sódico pesado para preparar 1 litro de solución, agua destilada.

Procedimiento Experimental y cálculos necesarios.

Se determina la normalidad exacta del ácido para esto se vierten 5 ml. De carbonato sódico en un vaso de precipitado y se completa hasta 100 ml con agua destilada, al volumen de carbonato sódico utilizado se le denomina v1 posteriormente se llena una bureta con el ácido a normalizar y se valora potencio métricamente hasta un valor de 4.5 se anota el volumen del ácido gastado en la titulación y se denomina como v2 después se realiza una titulación igual que el proceso anterior solo que se sustituye el carbonato por 100 ml completos de agua destilada, se anota nuevamente el volumen de ácido consumido para obtener un pH de 4.5 denominándolo v3, con estos datos se calcula la concentración real del ácido sulfúrico que se preparó utilizando la siguiente fórmula:

$$N (\text{ácido}) = \frac{m \cdot V1}{53(V2 - V3)} \quad [7]$$

N (ácido)= normalidad real del ácido

M= masa en gramos del carbonato de sodio utilizado en 1 litro de solución

V1= volumen en ml de la solución de carbonato de sodio (5ml)

V2= volumen en ml de la solución de ácido consumido en la titulación

V3= volumen en ml de la solución de ácido consumido en la valoración en blanco

Para el experimento realizado se obtuvo un N= 0.02144682333

Determinación de la alcalinidad total de las muestras.

Se introducen 50 ml del agua objeto de estudio V4 en un vaso de precipitado y se inicia la valoración con el ácido normalizado previamente, se anota el volumen consumido de ácido hasta obtener un valor de pH de 4.5 y se denomina V5, con estos datos es posible determinar la alcalinidad en mg/lit de las muestras mediante la siguiente ecuación:

$$\text{CaCO}_3 = \frac{V5 * N * 50 * 1000}{V4} \quad [8]$$

V5= ml de ácido utilizado para llegar a un pH de 4.5

N=normalidad real calculada del ácido

V4= ml utilizados del agua objeto de estudio

Finalmente debemos considerar que si las muestras de agua utilizadas presentaran un pH menos a 4.5 la cantidad de carbonatos sería imposible de determinar, recordando que a mayor acidez del agua menor presencia de carbonatos ya que son disueltos.

Determinación de sulfatos.

Para la determinación de sulfatos se siguió la norma mexicana NMX-AA-074-SCFI-2014 (MEDICIÓN DEL ION SULFATO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS-MÉTODO DE PRUEBA-, 2014).

El sulfato (SO₄) que podemos encontrar en el agua generalmente procede de materiales sedimentarios salinos, la oxidación de sulfuros (S) y de la descomposición de sustancias orgánicas, normalmente se conoce que la disolución de yeso en el agua el que mayores cantidades de ion aportan a el agua. Las concentraciones normales están en el rango de 2 a 150 mg/l, en agua de mar es de 3000 mg/l, para la presente experimentación se utilizará el método

turbidimétrico que se basa en que los iones sulfato de una muestra de agua precipitan en ácido clorhídrico (HCl) como sulfato de bario (BaSO_4), este precipitado se mide con ayuda de un espectrofotómetro.

Las muestras de agua deben diluirse $\frac{1}{2}$ para ello se colocarán 10 ml de muestra, 1 ml de ácido clorhídrico y 9 ml de agua destilada, si la conductividad eléctrica es > 10 ds/m la dilución será $\frac{1}{4}$ que sería igual a 5 ml de muestra, 1 ml de ácido clorhídrico y 14 ml de agua destilada. Posteriormente a estas diluciones se les añade cloruro de bario (BaCl_2), y se deja reposar unos minutos con esto tenemos lista la muestra a analizar, es importante recordar que el espectrofotómetro debe encontrarse calibrado y se escoge la longitud de onda de 650 nanómetros y se coloca una muestra de agua destilada en el equipo para poder calibrar el blanco (100).

El espectrofotómetro nos otorgará valores de absorbancia y para el cálculo de la concentración de sulfato utilizaremos la siguiente ecuación:

$$\text{Sulfato} = mx + n \quad [9]$$

m y n = valores obtenidos con la recta de regresión

x = valor absorbancia medido con el espectrofotómetro

Debemos tener en cuenta que los valores arrojados están dados en dilución y para obtener la concentración de sulfato final dada en (meq/l) será igual a la concentración de sulfato por la inversa del factor de dilución.

Determinación de nitratos.

Para la determinación de nitratos se siguió la norma mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001 (ANÁLISIS DE AGUAS - DETERMINACIÓN DE NITRATOS EN AGUAS NATURALES, POTABLES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA, 2001) el cual está basado en el método de cromatografía iónica, este experimento fue realizado por un laboratorio privado ya que las instalaciones de CCAPAMA no realizaban este análisis, así que la metodología corresponde a lo indicado en la NMX correspondiente.

4.5 Prueba Piloto

La prueba piloto se diseñó siguiendo como referencia las recomendaciones realizadas por (Alonso et al., 1987) en su revisión crítica del ensayo de cristalización de sales, la cual utiliza las normas R.I.L.E.M. (*Réunion Internatinal des Laboratoires d’Essais et de Recherches sur les Mateériaux et les Constructions*, 1980.) ensayo V.2. y la D.I.N. norma 52111.

Materiales y equipo

Se utilizó una cámara de vacío realizada en laboratorio con un desecador con llave y una bomba de vacío.

La prueba piloto se realizó con muestras de cantera roja y amarilla sometidas al proceso de cristalización de sales con solución salina a una concentración del 10%, y sometidas a procesos de saturación y desecación con agua destilada y agua de lluvia, recolectada entre los meses de julio y septiembre de 2019 en el estado de Aguascalientes, México, la nomenclatura utilizada es la mencionada en la Tabla 9:

Tabla 9. Muestras utilizadas en la prueba piloto. Elaboración propia.

Muestra	Abreviación
Cantera Amarilla con agua destilada	CAM-AD
Cantera Amarilla con agua salina al 10%	CAM-AS
Cantera Amarilla con agua de lluvia	CAM-AL
Cantera Amarilla con agua ácida	CAM-AA
Cantera Roja con agua destilada	CR-AD
Cantera Roja con agua salina al 10%	CR-AS
Cantera Roja con agua de lluvia	CR-AL
Cantera Roja con agua ácida	CR-AA
Cantera Roja con agua tratada	CR-AT

Para esta prueba se realizaron 8 ciclos de 24 horas cumpliendo los estándares requeridos por las normas D.I.N. E.N. 12370, en las cuales se consideraron 6 horas de sumersión, 12 horas de secado al horno con una temperatura constante de 60°C y 6 horas para que las muestras tomarán la temperatura del ambiente la cual osciló entre los 17°C/20°C, el agua utilizada durante los ciclos se mantuvo a una temperatura constante de 20°C, para la obtención del porcentaje de porosidad de las rocas se siguieron los protocolos establecidos en la norma DIN EN 772-4, usando una báscula Ohaus modelo PIONEER con capacidad máxima de 3200 grs y un sistema de fijación manual para la prueba de peso sumergido.

Los resultados arrojados por la prueba piloto (Tabla 10) demostraron que el mayor porcentaje de porosidad está en la muestra CR-AA con un 28% y CAM-AS con un 26%, las rocas con menor tamaño de poro son CAM-AL con 19% y CAM-AT con 18%.

Tabla 10. Valores de porosidad y densidad obtenidos en la prueba piloto. Elaboración propia.

Muestra	Porosidad (%)	Densidad de Matriz (g/cm ³)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Absorción al vacío (Gew %)
Cam-AT	17.99	2.07	1.70	10.59
Cam-AS	25.79	2.08	1.55	16.68
Cam-AD	21.56	2.13	1.67	12.93
Cam-AL	19.16	2.22	1.79	10.69
Cam-AA	19.77	2.10	1.69	11.72
CR-AT	25.53	2.08	1.55	16.49
CR-AS	22.15	2.20	1.71	12.95
CR-AD	27.17	2.38	1.73	15.71
CR-AL	26.84	2.19	1.60	16.74
CR-AA	28.21	2.26	1.62	17.38

Ciclos de sumersión y desecación.

Para las muestras sometidas a procesos con agua destilada (Figura 24) no se observó ningún cambio en su textura y composición, el peso a lo largo de 8 ciclos para la CAM disminuyó un 3% respecto al peso inicial y la CR presentó una disminución del 0.13%. En las muestras sometidas al agua de lluvia (Figura 24), para la CAM se observó un desgaste bajo en sus caras lo que ocasiono que su textura se percibiera más porosa, la CR presentó un desgaste bajo en las caras, la

textura permaneció igual, el peso a lo largo de los ciclos disminuyó 0.04% y 0.18% respectivamente.

Las muestras sometidas al agua con pH de 4.30 simulando la acidez de la lluvia (Figura 25), no mostraron cambios en su textura y composición, las variaciones de peso para la CAM y CR fueron de 0.03% y 0.06%.

Aquellas muestras sometidas al agua tratada (Figura 25) se observan para CAM que a partir del 5to. Ciclo aparece una fisura en dos de las caras, aumentando de tamaño en cada ciclo posteriormente. Para CR se observa un aumento en su porosidad quedado al descubierto minerales de ± 1 mm. Y las variaciones de peso fueron ínfimas presentando 0.004% y 0.0041%.

Para las muestras sometidas a ciclos de cristalización por sales (Figura 26) con una concentración de sulfato del 10% presentaron variaciones propias de las tobas sujetas a este tipo de experimentación, de manera visual en CAM se produjo una pérdida de material por desintegración de aproximadamente el 20% de su constitución primaria y para CR se observa un aumento en la gradación de color y una mayor visibilidad en los poros, las variaciones de peso fueron de 24% y 0.31% respectivamente.



Figura 23. Cambios en el peso en gramos de las muestras sometidas a los procesos de saturación y desecación de pruebas piloto. Elaboración propia.

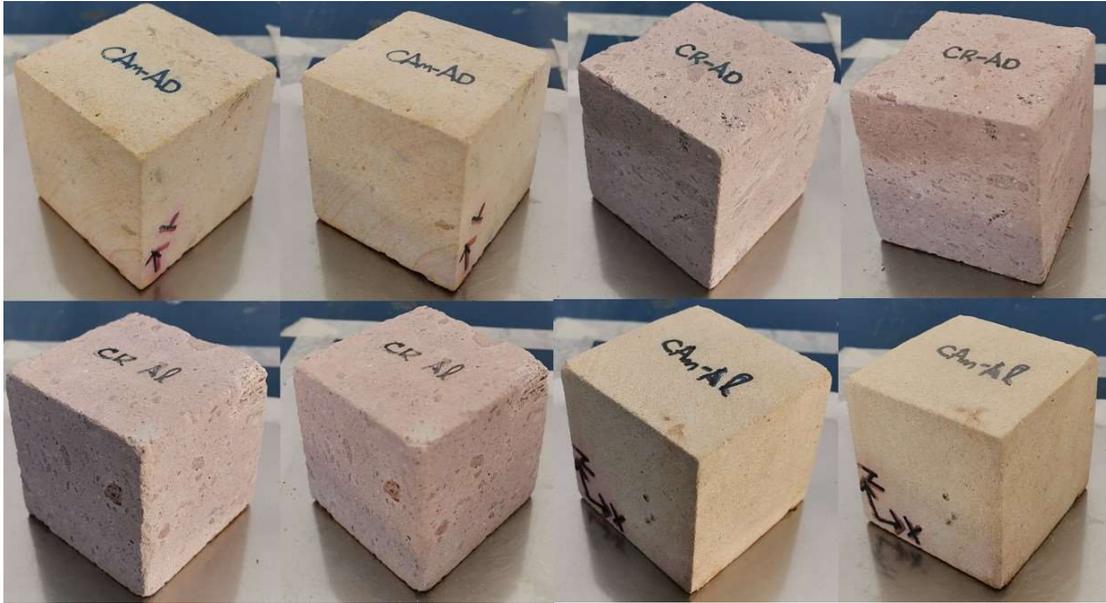


Figura 24. Diferencia entre el 1er y 8vo ciclo (izquierda 1er ciclo, derecha 8vo ciclo), para las muestras expuestas al agua destilada y al agua de lluvia. Elaboración propia.

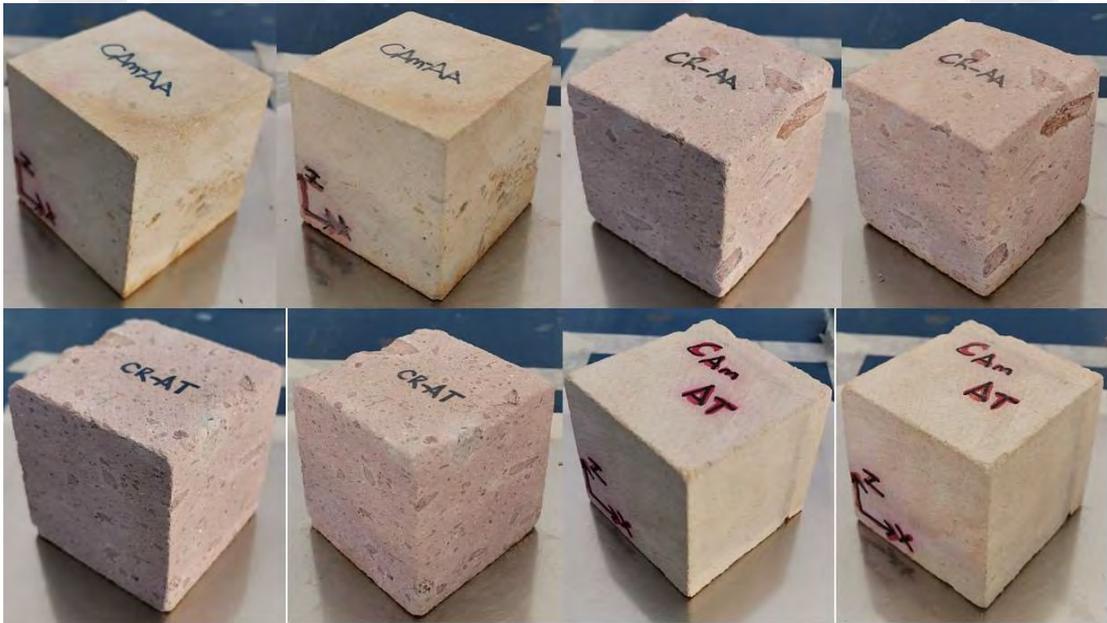


Figura 25. Diferencia entre el 1er y 8vo ciclo (izquierda 1er ciclo, derecha 8vo ciclo), para las muestras expuestas al agua de lluvia ácida y al agua tratada. Elaboración propia.

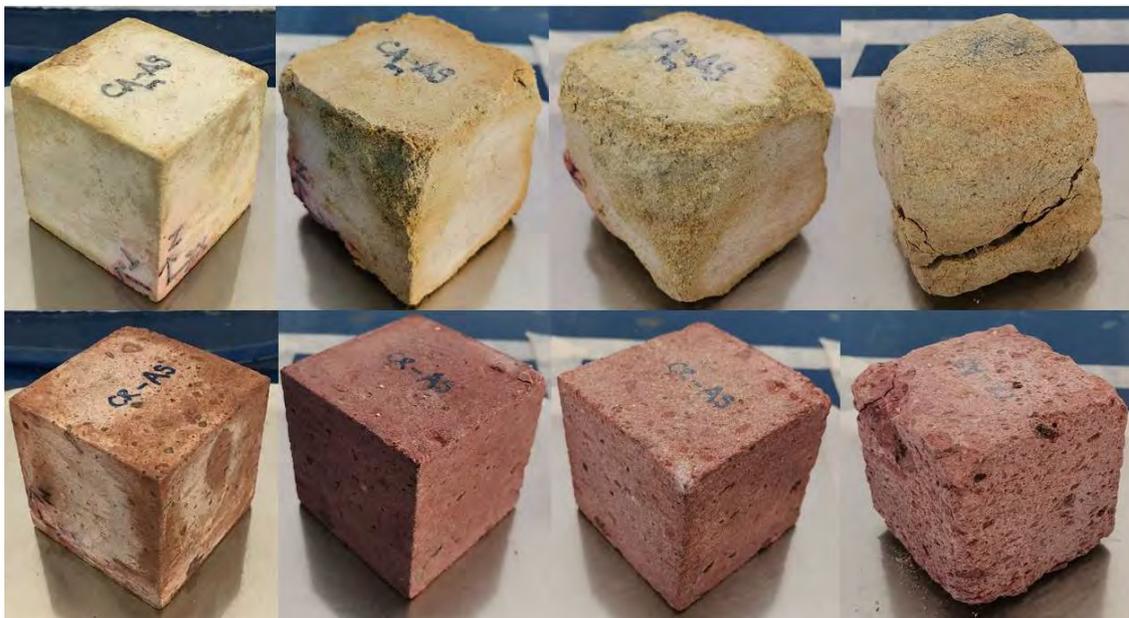


Figura 26. Diferencia entre el 1er. y el 8vo. ciclo. (de izquierda a derecha 1er, 3er, 5to y 8vo. ciclo respectivamente), para las muestras tratadas con agua y concentración de Na_2SO_4 . Elaboración propia.

4.6 Correcciones al experimento.

Se determinó realizar de manera más minuciosa los ensayos para determinar la porosidad efectiva de las muestras ya que se considera que los resultados arrojados por la prueba piloto pudieron ser erróneos debido a que generalmente se ha presentado en otras investigaciones que la cantera amarilla tiende a ser mucho más porosa que la cantera roja.

También se realizaron cambios en los tiempos de los ciclos de sumersión y secado (Tabla 11) debido a que en las pruebas piloto se observaba que con tiempos de secado cortos las muestras no alcanzaban a secarse por completo ocasionando variaciones en los pesos hacia arriba o hacia abajo, así mismo la temperatura de secado en horno se elevó a 90°C para que las rocas pudieran secarse de manera adecuada, a continuación, se presentan las variaciones realizadas en el experimento de saturación.

Tabla 11. Tiempos finales para la experimentación en saturación. Elaboración propia.

	Sumersión	Secado en Horno	Temp. Ambiente	Duración ciclo
Prueba Piloto	6 horas	12 horas a 60°C	6 horas	24 horas
Campaña Experimental	4 horas	18 horas a 90°C	2 horas	24 horas

Los tiempos establecidos para la campaña experimental respetan los límites establecidos por la norma R.I.L.E.M. ensayo V.2.

Debido a la contingencia ocasionada por el COVID-19 los experimentos tuvieron que realizarse en un laboratorio improvisado en casa por lo que las condiciones controladas que se esperaban tener en el laboratorio intentaron recrearse lo más posible, siendo esto un posible factor determinante en las variaciones de resultados finales de la experimentación.

CAPÍTULO V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Propiedades Petrográficas

Debido a que la pandemia no permitió realizar difracción de rayos X en las muestras estudiadas, los resultados a los análisis petrográficos se obtuvieron utilizando rocas con características similares a las obtenidas por los investigadores (Molina Maldonado, 2016) y (Kueck, 2019).

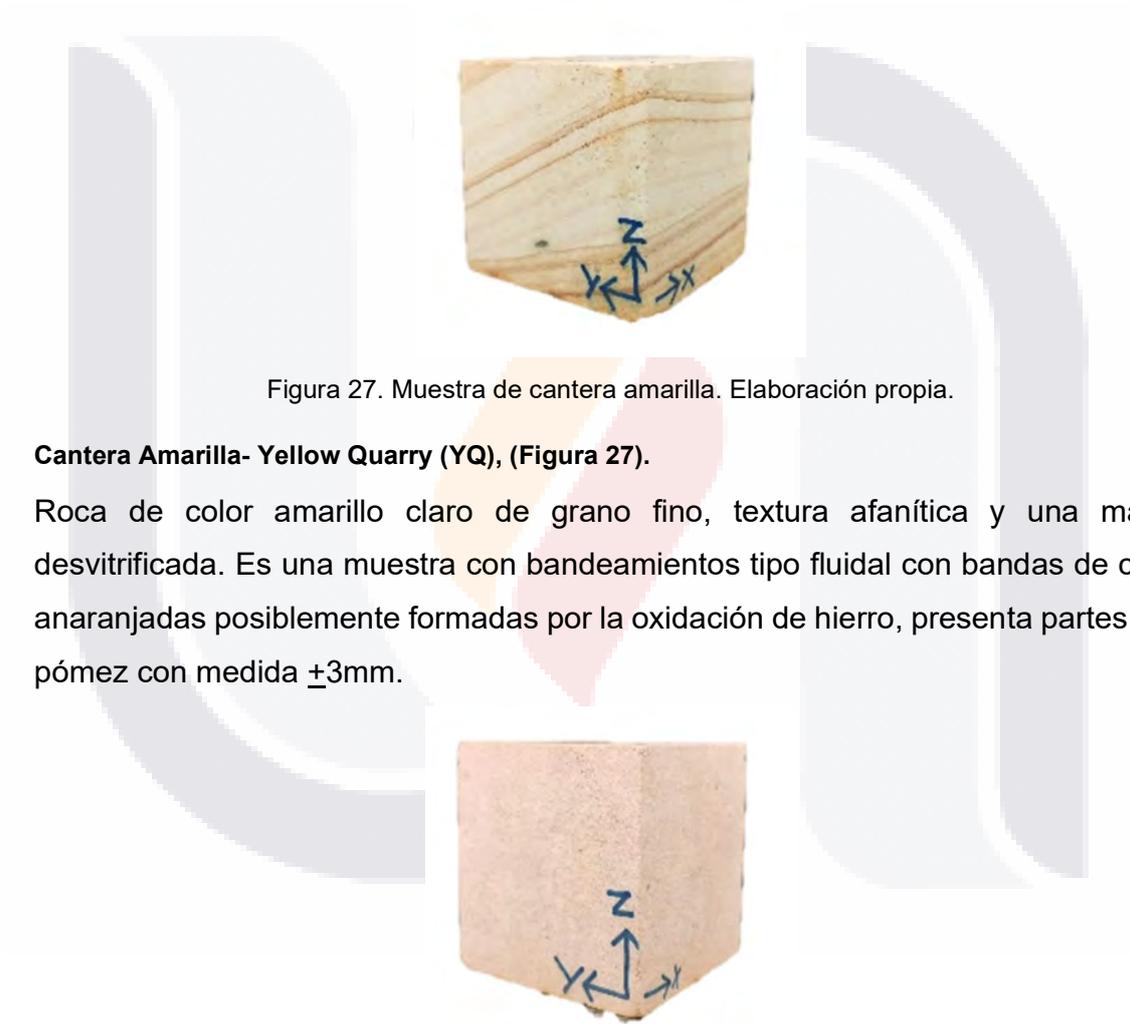


Figura 27. Muestra de cantera amarilla. Elaboración propia.

Cantera Amarilla- Yellow Quarry (YQ), (Figura 27).

Roca de color amarillo claro de grano fino, textura afanítica y una matriz desvitrificada. Es una muestra con bandeamientos tipo fluidal con bandas de color anaranjadas posiblemente formadas por la oxidación de hierro, presenta partes con pómez con medida $\pm 3\text{mm}$.

Figura 28. Muestra de cantera roja. Elaboración propia.

Cantera Roja- Red Quarry (RQ), (Figura 28).

Es una toba de color rojo-anaranjado de grano fino a medio en su textura y matriz vítrea tiene un porcentaje de aproximadamente 10% de líticos de +1mm de grosor,

se observan partes con pómez que se alargan y se comprimen de manera firme estos clastos de pómez muestran características de desvitrificación.

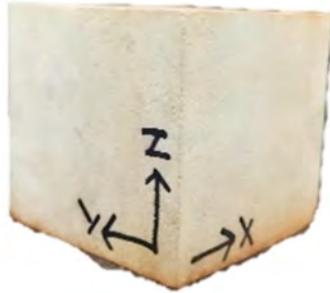


Figura 29. Muestra de cantera verde. Elaboración propia.

Cantera Verde- Green Quarry (GQ), (Figura 29).

Para esta muestra no existe una similitud con alguna otra probeta de cantera estudiada previamente por lo que el análisis de sus características petrográficas quedará pendiente para futuras investigaciones.

5.2 Propiedades de espacio de poro en las rocas

Porosidad

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las rocas examinadas (Tablas 12, 13 y 14), la tabla que hace referencia al análisis de la cantera roja (Tabla 14) está basada en las pruebas piloto del presente trabajo de investigación debido al cierre que se ocasionó en el laboratorio de materiales de la UAA debido a la pandemia de COVID-19, dejando inconclusos los experimentos referentes a esta muestra pero, como la cantera roja de la campaña experimental y de las pruebas piloto provienen del mismo banco se optó por utilizar estos resultados.

Tabla 12. Cantera Amarilla, porcentaje de porosidad efectiva (%), densidad de matriz (g/cm³), densidad aparente (g/cm³). Elaboración propia.

MUESTRA	Porosidad [%]	Densidad de Matriz (g/cm ³)	Densidad Aparente (Bulk)(g/cm ³)
YQ-DW1	39.344	2.564	1.555
YQ-TW1	39.161	2.586	1.573
YQ-TW2	38.726	2.581	1.582
YQ-TW3	38.536	2.572	1.581
YQ-TK	39.135	2.578	1.569
PROMEDIO	38.980	2.576	1.572

Tabla 13. Cantera Verde, porcentaje de porosidad efectiva (%), densidad de matriz (g/cm³), densidad aparente (g/cm³). Elaboración propia.

MUESTRA	Porosidad [%]	Densidad de Matriz (g/cm ³)	Densidad Aparente (Bulk)(g/cm ³)
GQ-DW1	40.719	2.550	1.511
GQ-RW1	36.181	2.537	1.619
GQ-UW1	38.950	2.550	1.557
GQ-Na ₂ SO ₄ 1	34.602	2.537	1.659
GQ-TK	37.301	2.541	1.593
PROMEDIO	37.551	2.543	1.588

Tabla 14. Cantera Roja, porcentaje de porosidad efectiva (%), densidad de matriz (g/cm³), densidad aparente (g/cm³). Elaboración propia.

MUESTRA	Porosidad [%]	Densidad de Matriz (g/cm ³)	Densidad Aparente (Bulk)(g/cm ³)
CR-AT	25.531	2.079	1.548
CR-AS	22.148	2.197	1.710
CR-AD	27.173	2.376	1.730
CR-AL	26.844	2.192	1.603
CR-AA	28.206	2.261	1.623
PROMEDIO	25.980	2.221	1.643

Se observa que la roca con más porcentaje de porosidad es la cantera amarilla (YQ-DW1) con 39.34% que se utilizó con agua destilada, la muestra menos porosa es la cantera roja (CR-AS) 22.14% que se utilizó con agua saturada de sulfato.

Las muestras de porosidad media en este trabajo serán las de cantera verde (GQ) con un valor promedio de 37.55% la cual no está muy alejado del valor presentado por la cantera amarilla 38.98%.

Los tres tipos de cantera entran en la clasificación de muy porosa ya que presentan un porcentaje de porosidad mayor al 20%.

Densidades.

La muestra que presenta una mayor densidad aparente es la cantera roja (RQ) con 1.643 g/cm³ y la más baja es la cantera amarilla (YQ) con 1.572 g/cm³. Existe un fenómeno de relación que dice que entre menos denso sea el material mayor será su porosidad lo cual puede verificarse en la Figura 30.

Según la clasificación de Popp (1994) las rocas utilizadas pueden clasificarse como rocas del grupo félsico ya que su densidad es menor que 2.8 g/cm³.

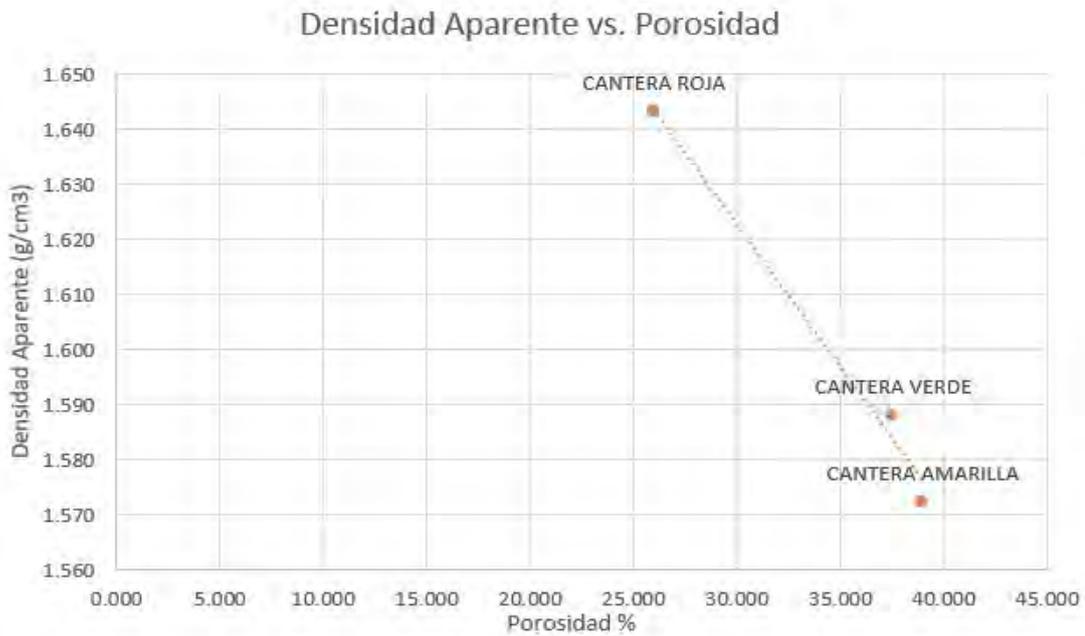


Figura 30. Gráfica de densidad aparente (g/cm³) vs. Porosidad (%). Elaboración propia.

Distribución de radio de poro.

Para esta clasificación se utilizará la realizada por (Ruedrich & S., 2006) que se definen en distribución unimodal (igual en un rango de tamaño de poro), distribución desigual y distribución bimodal.

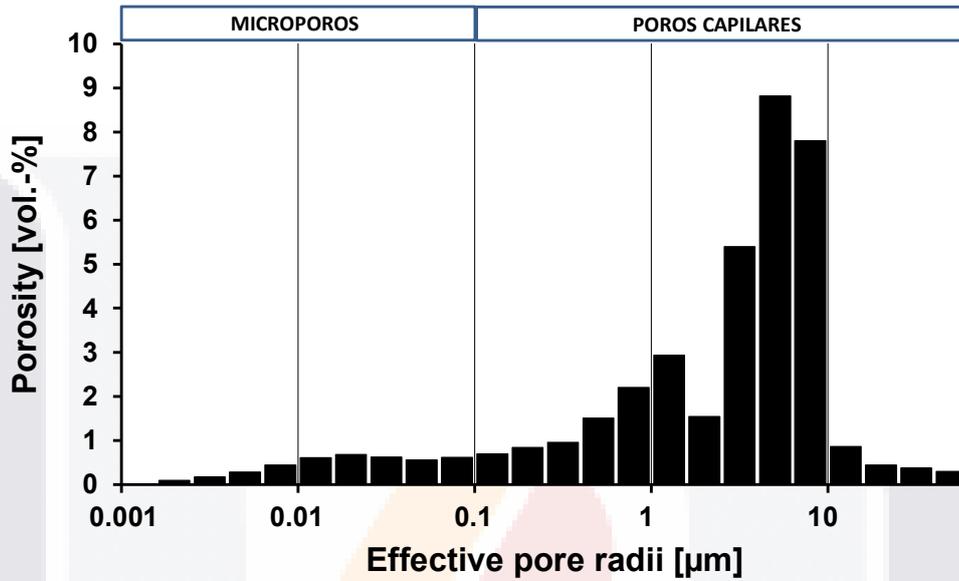


Figura 31. Histograma de la distribución del radio de poro Cantera Amarilla (YQ). Dpto. de Geología Estructural de la Universidad de Göttingen, Alemania,(2020).

El histograma para la cantera amarilla (Figura 31) muestra una distribución unimodal con picos en la zona de poros capilares (macroporos), el tamaño de poro promedio en esta roca es de 0.1088 µm.

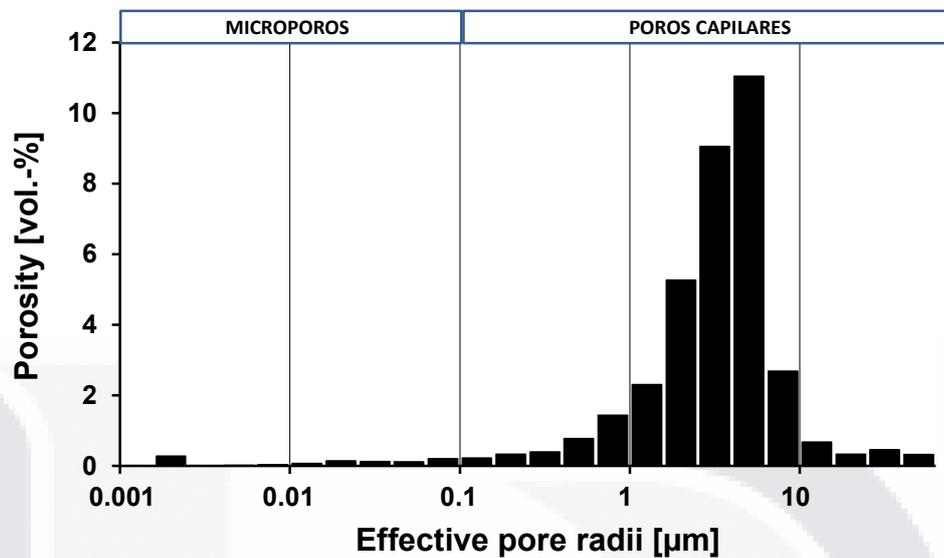


Figura 32. Histograma de la distribución del radio de poro Cantera Verde (GQ). Dpto. de Geología Estructural de la Universidad de Göttingen, Alemania, (2020).

El histograma para la cantera verde (Figura 32) muestra una distribución unimodal con picos en la zona de poros capilares y se destaca que casi no cuenta con microporos el tamaño de poro promedio en esta roca es de 0.1871 μm.

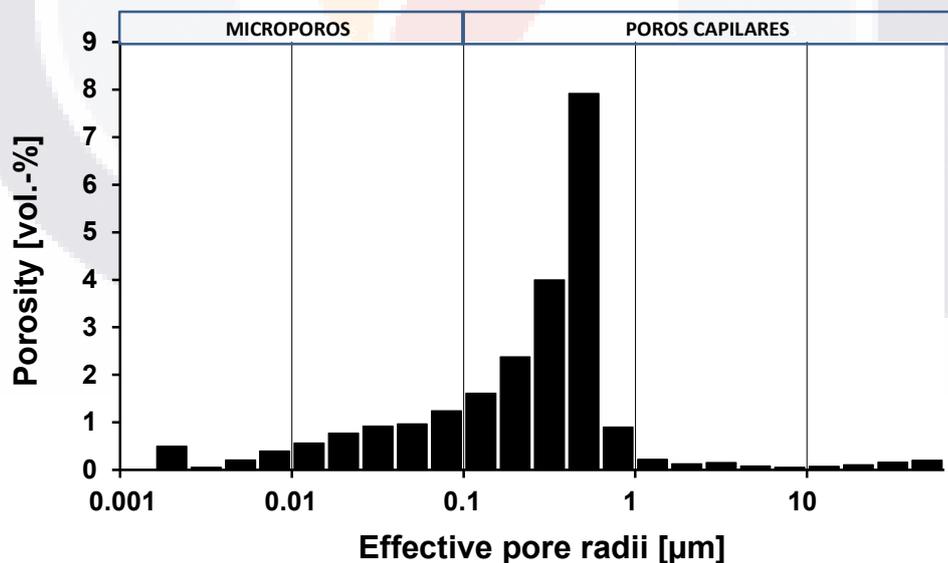


Figura 33. Histograma de la distribución del radio de poro Cantera Roja (RQ). Dpto. de Geología Estructural de la Universidad de Göttingen, Alemania, (2020).

El histograma para la cantera roja (Figura 33) muestra una distribución bimodal con picos en la zona de poros capilares, aunque debe notar el tamaño de poro promedio en esta roca es de 0.0436 μm lo cual la coloca en la zona microporosa.

Tabla 15. Comparativa entre porosidad (%), tamaño promedio de poro (μm) y tipo poro en las muestras analizadas. Elaboración propia.

Muestra	Porosidad (%)	Tamaño promedio de poro (μm)	Tipo de poro dominante
Cantera Amarilla (YQ)	39	0.1088	Capilar
Cantera Verde (GQ)	37	0.1871	Capilar
Cantera Roja (RQ)	22	0.0436	Microporo / Capilar

Se puede concluir según la Tabla 15 que, aunque para la cantera amarilla y verde el porcentaje de porosidad es similar, así como el tamaño promedio de sus poros, la diferencia radica en que la cantera verde no presenta microporos en su estructura, al contrario de la amarilla.

La cantera roja al tener mayor cantidad de microporos hace más difícil que el agua saturada de sulfato circule a través de su red porosa y, en consecuencia, aunque la sal si cristaliza dentro de la roca, el tamaño promedio de poro hace que el espacio que tiene la sal para crecer sea más reducido esto explica por qué esta roca tiende a soportar tantos ciclos de cristalización y también puede explicar porque su proceso de desgaste como se verá más adelante se da en forma de desmoronamiento.

Absorción de agua.

Resultados obtenidos de esta experimentación son la cantidad de agua (ml.) absorbida por cada espécimen de roca previo y posterior a los 30 ciclos de saturación y desecación en las aguas contaminadas (Figura 34).

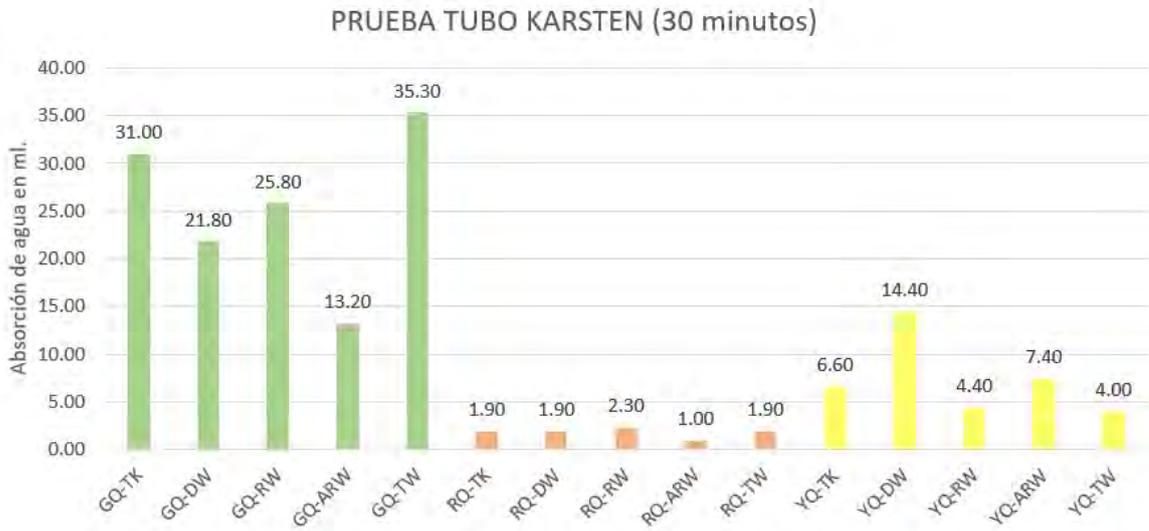


Figura 34. Cantidad total de agua absorbida por muestra de cantera en ml. a lo largo de 30 minutos. Elaboración propia.

Para las muestras de cantera amarilla la muestra inalterada (YQ-TK) presentó una capacidad de absorción de 6.60 ml. y para las muestras sometidas al agua de lluvia (YQ-RW) y tratada (YQ-TW) presentaron una disminución del 33% y 39% respectivamente en su capacidad de absorción, las muestras que aumentaron la capacidad fue la de agua destilada con 54% y la de agua tratada en un 11%.

Se puede observar que la cantera verde es la muestra que más cantidad de absorción presenta en los 30 minutos que dura el experimento, presenta en la muestra inalterada (GQ-TK) una capacidad de absorción de 31 ml. de agua, pero este valor de absorción disminuye al ser sometida a experimentación con muestras expuestas a ciclos de agua destilada (GQ-DW), agua de lluvia (GQ-RW) y agua simulando lluvia ácida (GQ-ARW) en un rango que varía entre 17- 5 ml. un promedio de disminución del 35%.

Es importante hacer mención que para la muestra sometida a ciclos con agua tratada (GQ-TW) la relación de absorción es inversamente proporcional a las demás muestras lo que quiere decir que su capacidad de absorción aumentó un 14% con respecto a la muestra inalterada.

La cantera roja es la que menos variaciones presenta en su capacidad de absorción de agua la muestra inalterada (RQ.TK) presenta una capacidad de absorción de 1.9

ml de agua dato que no varía para las muestras con agua destilada (RQ-DW) y agua tratada (RQ-TW), en la muestra de agua de lluvia (RQ-RW) la capacidad de absorción se incrementó 0.40 ml. lo que es equivalente a un 17% y la muestra de lluvia ácida (RQ-ARW) disminuyó a 1.00 ml que es igual a un decremento del 47% respecto de la muestra inalterada, la cantera roja fue la muestra que menos cantidad de agua absorbió esto debido a que su porcentaje de porosidad y tamaño de poro (microporos) es menor que las otras muestras lo que dificulta el tránsito del agua por la red porosa.

Las variaciones en la disminución de la capacidad de absorción en las muestras pueden deberse a que como lo menciona (F. J. Alonso Rodríguez, 2004) este tipo de cantera presente una adsorción química del agua y que conforme pasen los ciclos de saturación y desecación las moléculas de agua queden inmóviles dentro del sólido y ocasionen que el agua nueva que intenta moverse dentro de la red porosa no fluya.

Para inferir que ocurre con el aumento en la capacidad de absorción puede comentarse que cuando se somete una roca a meteorización su porosidad aumenta, fenómeno que está presente en los procesos de saturación-desecación y esto genera que los poros se desgasten y aumenten su tamaño por tanto el flujo del agua por la roca es mayor.

Recordando que no todas las muestras de roca aumentan su capacidad de absorción se recomienda para futuras investigaciones realizar pruebas en la composición mineralógica de las muestras y en las propiedades químicas del agua previa y posterior a los ciclos para conocer si el proceso de meteorización que se está presentando es de índole químico, esto podría explicar que existan ciertos tipos de agua que ocasionen esta meteorización en la roca.

Otra posible causa del aumento en la capacidad de absorción del agua podría deberse a que el lugar de la muestra donde se coloca la columna de agua coincida con una red porosa muy interconectada y por ende el agua fluya de mejor manera, en la presente investigación las pruebas se realizaron 3 veces para cada muestra obteniendo en cada ensayo resultados similares.

Compresión Uniaxial

Según la clasificación ISRM para la resistencia de las rocas la cantera roja es moderadamente blanda, las muestras verde y amarilla entran en la clasificación de blandas.

Existe una relación lineal entre la fuerza de compresión y la porosidad, como y se mencionó con anterioridad a mayor porosidad de la roca menor resistencia a la compresión.

En la figura 35 podemos advertir esta correlación observado que la cantera roja que es la menos porosa con un 26% y un tamaño de poro de 0.04 μm tuvo una mayor resistencia a la compresión en todos los casos y la cantera verde y amarilla consideradas las muestras más porosas con un porcentaje de porosidad de 37.55% y 38.98% respectivamente y un tamaño de poro para la verde de 0.18 μm y para la amarilla de 0.10 μm tienen una resistencia ante el esfuerzo de compresión menor.

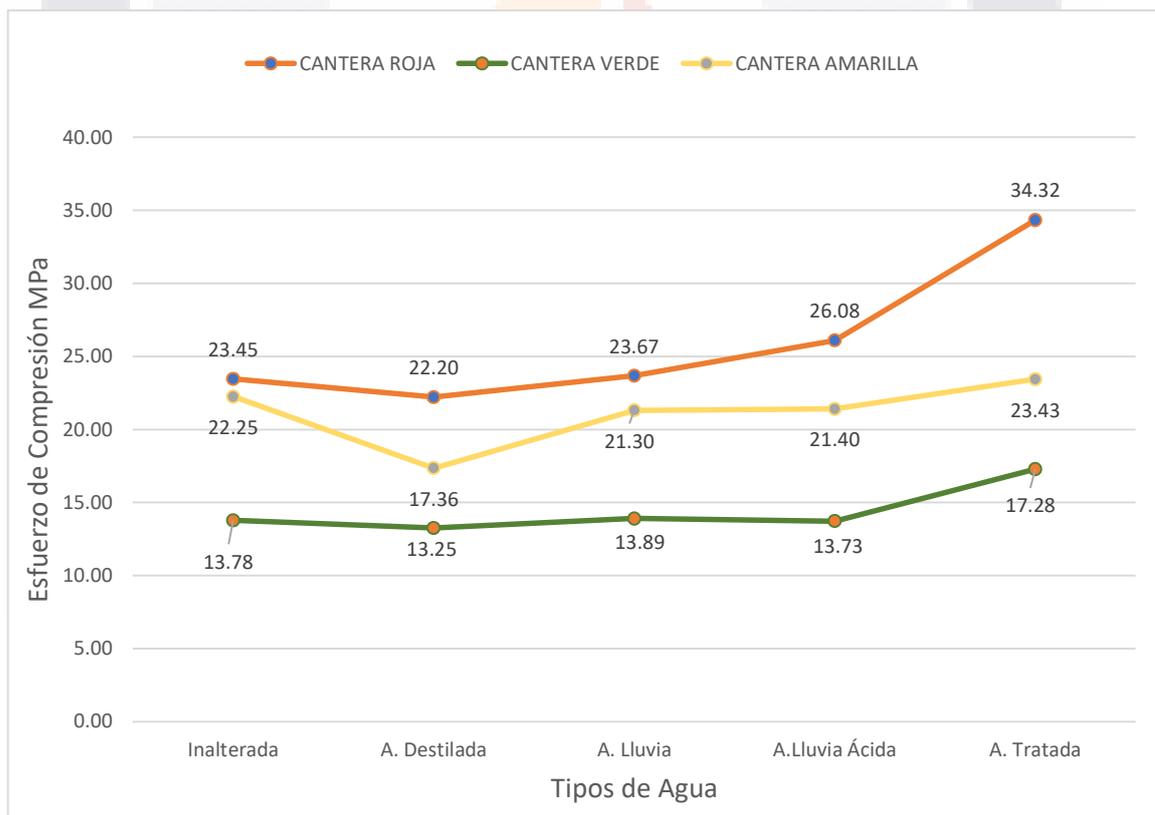


Figura 35. Gráfica de esfuerzo de compresión (MPa) para cada tipo de roca vs tipos de agua utilizada. Elaboración propia.

En estas pruebas se da un fenómeno interesante ya que se observa como constante que las muestras sometidas a ciclos con agua tratada mostraron un aumento en su resistencia a la compresión.

Cantera Amarilla

Esta cantera fue sometida al experimento siguiendo los planos de discontinuidad del eje X, se puede observar (Figura 36) que la muestra sometida a ciclos con agua tratada (YQ-TW,) solo presenta fisuras al fallo en la parte media-baja y las otras muestras presentan grietas en el momento del fallo.

Esta cantera presenta un esfuerzo a la compresión de 22.25 MPa en la muestra inalterada, y se observa que con excepción del agua tratada en la cual su capacidad de compresión se ve incrementada en un 5% todas las demás probetas disminuyen su resistencia al esfuerzo en un rango entre el 4% y 21% (Figura 37).

La falla de esta cantera se presenta en forma de fracturas que se forman de manera perpendicular a sus planos de discontinuidad.

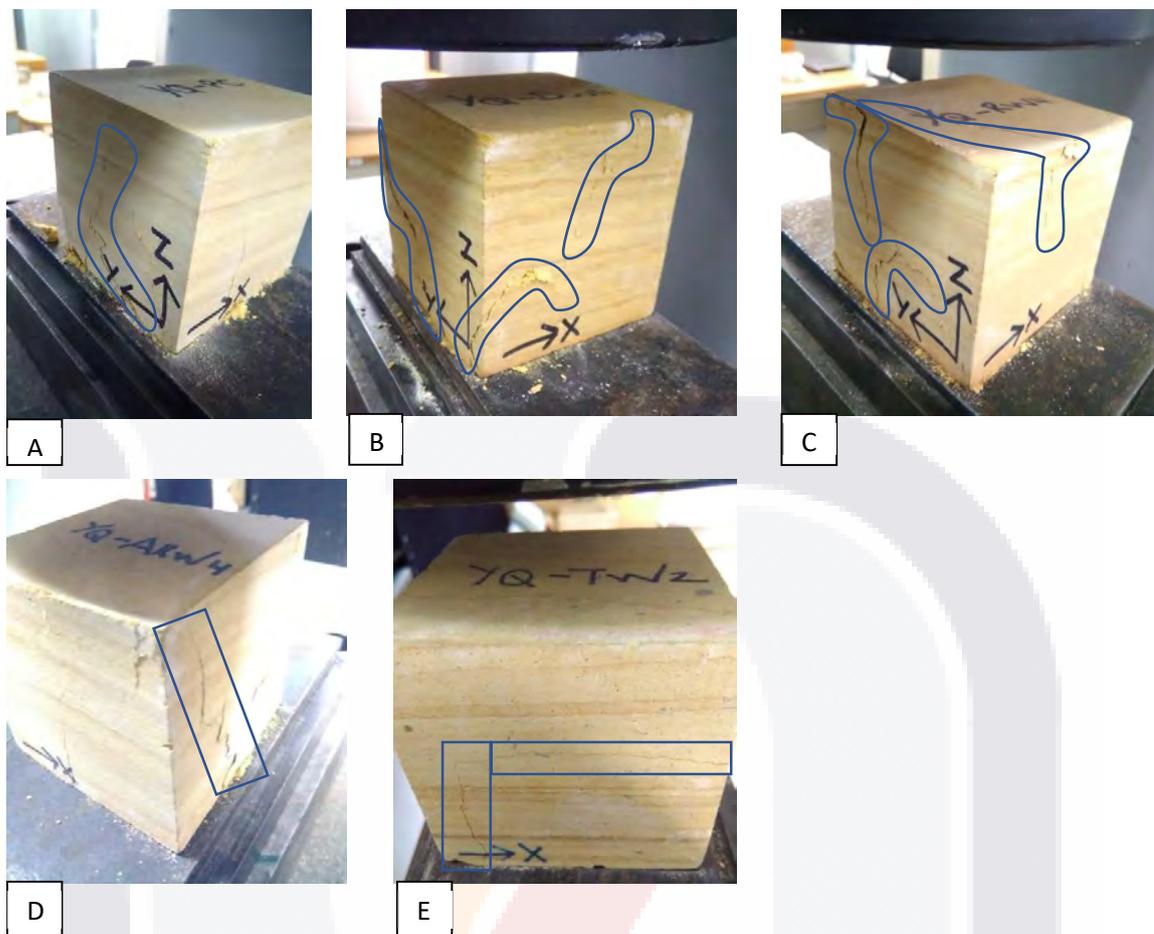


Figura 36. Muestras cantera amarilla sometidas a ensayo de compresión uniaxial, A. Muestra Inalterada, B. Muestra sometida Agua Destilada, C. Muestra sometida Agua Lluvia, D. Muestra sometida Agua Lluvia Ácida, E. Muestra sometida Agua Tratada. Elaboración propia.

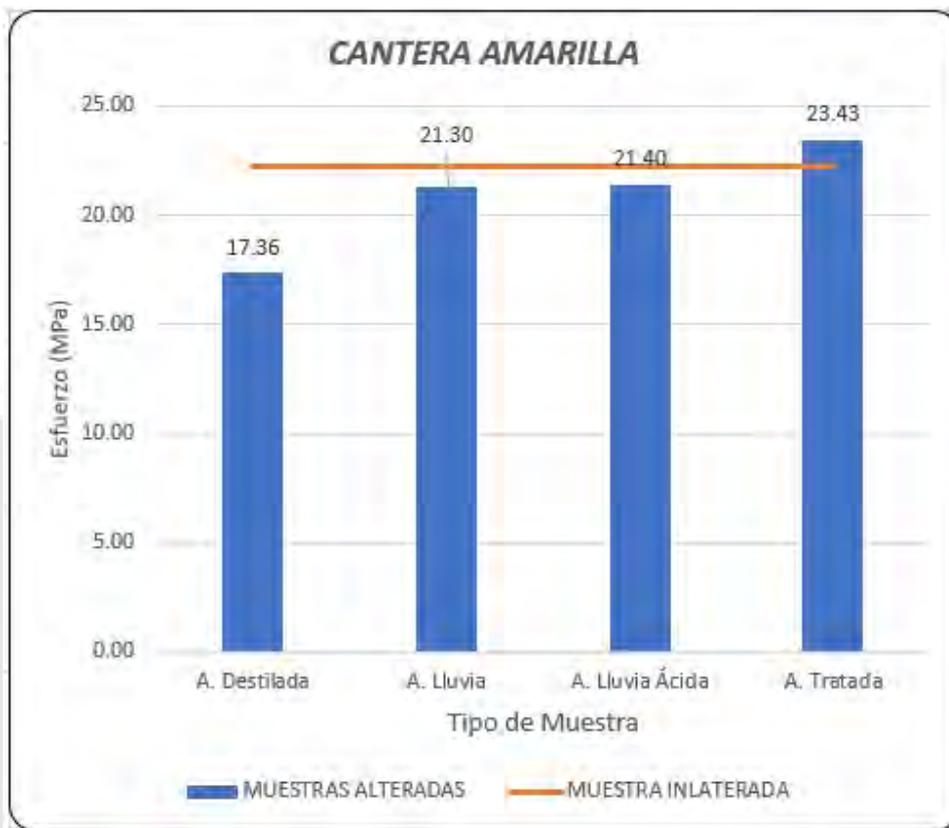


Figura 37. Gráfica de esfuerzo de compresión (MPa) para cantera amarilla vs tipos de agua utilizada. Elaboración propia.

Cantera Verde.

La falla de esta cantera se presenta en forma de fracturas y estallamiento en el material (Figura 38). Esta cantera presenta un esfuerzo a la compresión de 12.78 MPa en la muestra inalterada, y se observa que en las demás probetas su capacidad se incrementa en un promedio de 18.04 MPa lo que es un 30% de incremento (Figura 39), esto puede deberse a que la prueba con la muestra inalterada no fue realizada correctamente y para futuras investigaciones deba hacerse a 2 o 3 muestras inalteradas para poder realizar una comparativa y obtención de porcentajes adecuados.

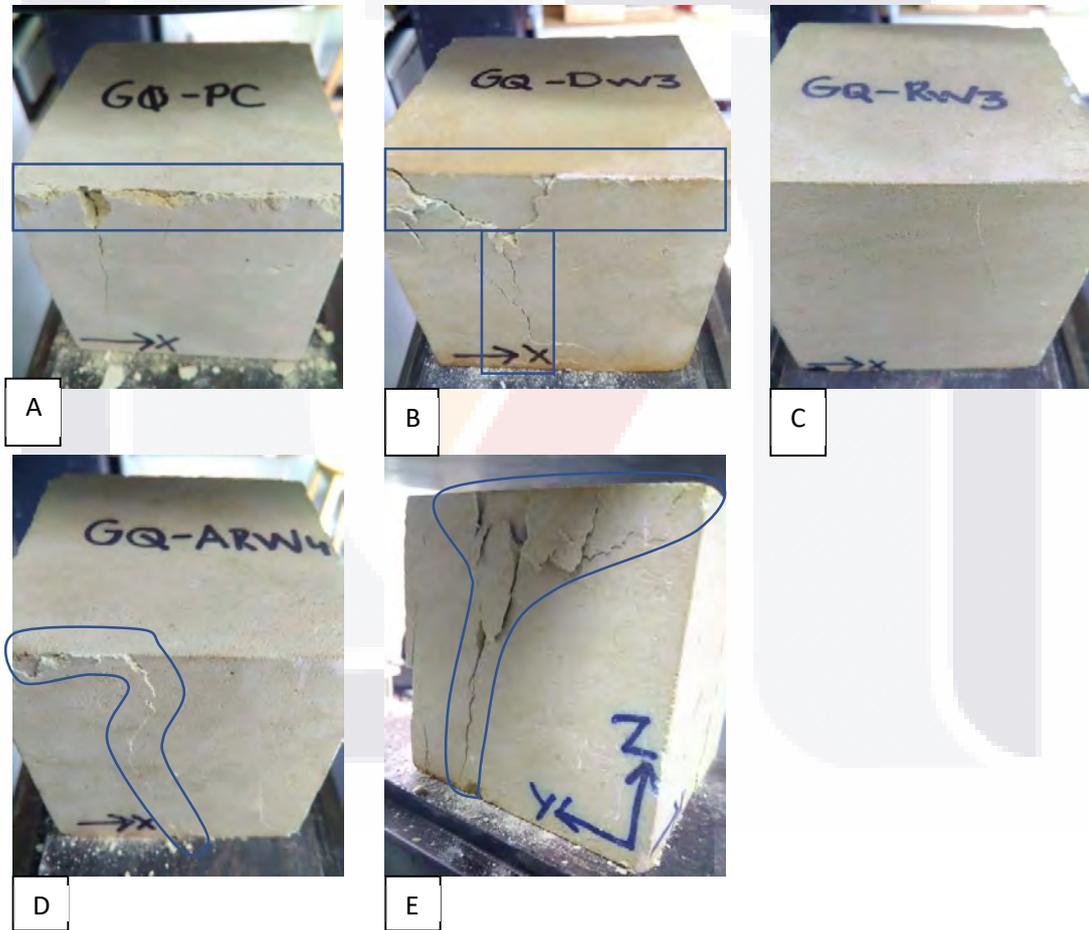


Figura 38. Muestras cantera verde sometidas a ensayo de compresión uniaxial
 A. Muestra Inalterada, B. Muestra sometida Agua Destilada, C. Muestra sometida Agua Lluvia,
 D. Muestra sometida Agua Lluvia Ácida, E. Muestra sometida Agua Tratada. Elaboración propia.

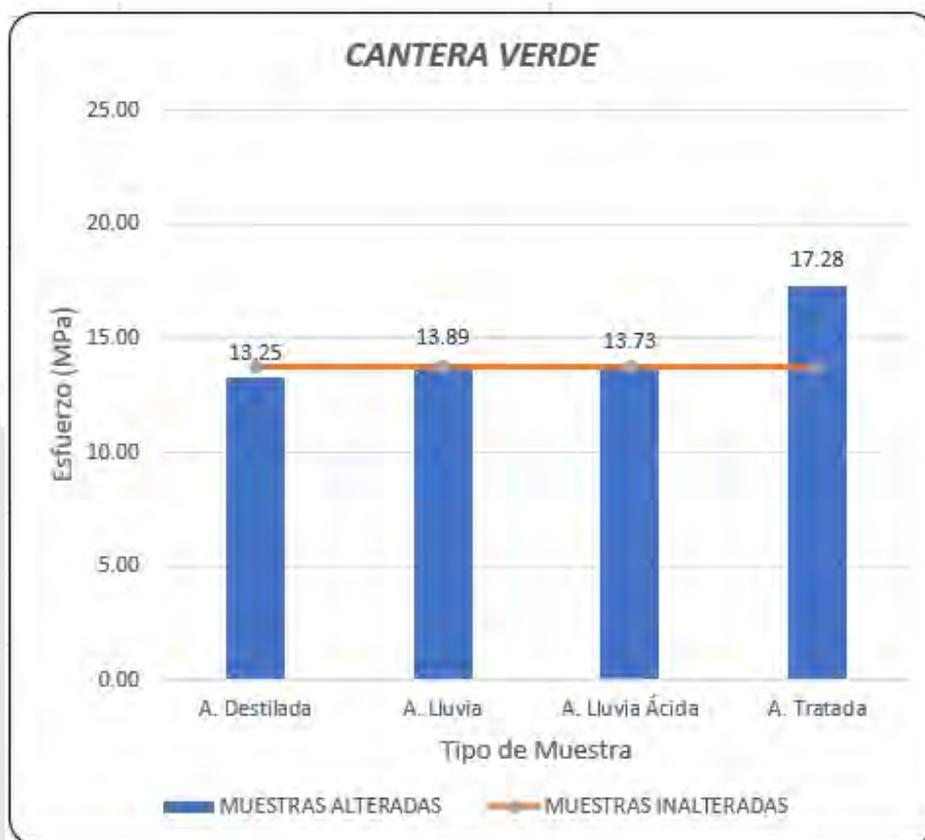


Figura 39. Esfuerzo de compresión (MPa) para cantera verde vs tipos de agua utilizada. Elaboración propia.

Cantera Roja.

La cantera roja al ser la de porosidad más baja es la que muestra una mayor resistencia a la compresión con 23.45 MPa y presenta un fenómeno similar al de las canteras verde y amarilla ya que su resistencia aumenta con la roca sometida al agua tratada, el incremento se da en un 31%, también ocurre un incremento del 10% con la muestra sometida en agua de lluvia ácida mientras que para el agua de lluvia permanece sin cambios significativos, presenta un decremento para el agua destilada de un 6% (Figura 41).

La falla de esta cantera se presenta en forma de fracturas principalmente (Figura 40).



Figura 40. Muestras cantera roja sometidas a ensayo de compresión uniaxial
 A. Muestra Inalterada, B. Muestra sometida Agua Destilada, C. Muestra sometida Agua Lluvia,
 D. Muestra sometida Agua Tratada. Elaboración propia.

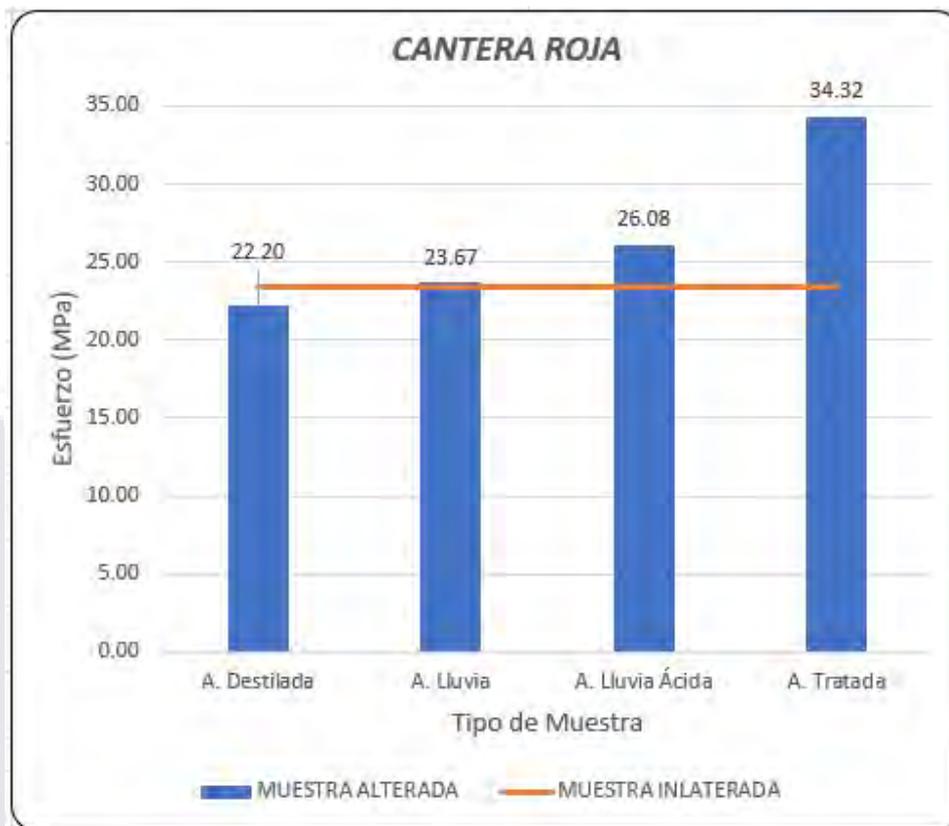


Figura 41. Gráfica de esfuerzo de compresión (MPa) para cantera verde vs. tipos de agua utilizada. Elaboración propia.

Como conclusión se observa que existe un fenómeno de aumento en las resistencias para aquellas muestras con agua tratada, posiblemente el agua contenga alguna sustancia como grasas, aceites o materia orgánica no presentes en los otros tipos de agua ya que el origen del agua tratada es de residuos de uso orgánico, al someter las muestras de roca a ciclos de saturación y desecación bajo este tipo de agua la red porosa puede quedar con residuos estas grasas lo que puede ocasionar un aumento en su cohesión y por ende aumentar su resistencia. Otro indicador de que existe la posibilidad de que la red porosa de las rocas tienda a almacenar restos de sólidos que existan en las aguas es el aumento que tienen las muestras de cantera roja al ser sometidas a los diferentes tipos de agua ya que solo exceptuando el agua destilada las demás tuvieron un aumento en su capacidad de resistencia a la compresión. Se puede observar que en la cantera verde que es

la que presenta un tamaño promedio de por más grande los cambios en su resistencia a la compresión no son significativos lo que nos habla que el agua corre más fluidamente a través de su red porosa y los sólidos no se almacenan en ella. Finalmente las muestras sometidas a procesos con agua destilada se presentó una disminución en su capacidad de resistencia, este fenómeno puede deberse a que el agua destilada al ser un líquido purificado y no presentar más que hidrógeno y oxígeno en su composición al moverse a través de la red porosa de la roca provoque un fenómeno de limpieza dentro de la red porosa y tomando en cuenta que la matriz en la cantera es inestable ya que es desvitrificada y cuando entra en contacto con el agua tiende generar un estado donde presenta un fenómeno de licuefacción y provoca que la roca pierda cohesión.

Ciclos de saturación- desecación.

En estos experimentos podemos observar el efecto de los diferentes tipos de contaminación en el agua y sus efectos en las rocas. Las muestras se sometieron a 30 ciclos de sumersión desecación, como se detalló en el capítulo de diseño experimental.

Agua destilada

Se observa que las muestras sometidas a ciclos con agua destilada no mostraron cambios físicos en su composición (Figuras 42, 44 y 46) y las variaciones de peso inicial y final fueron para la cantera amarilla de un promedio de -1.30 grs. (Figura 45), para la cantera verde de -0.58 grs. (Figura 43) y para la cantera roja de -4.19 grs. (Figura 47). Se observa en las gráficas que la cantera verde y amarilla tienen una tendencia lineal y que la cantera roja tiene variaciones en los primeros quince ciclos y posterior a ello presenta una tendencia continua, la disminución en el peso final de las muestras puede deberse a que al someter las rocas a ciclos de saturación y desecación con agua destilada se presente un efecto de limpieza en la red porosa eliminando partículas sólidas ajenas a la roca original.



Figura 42. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera amarilla en agua destilada. Elaboración propia.

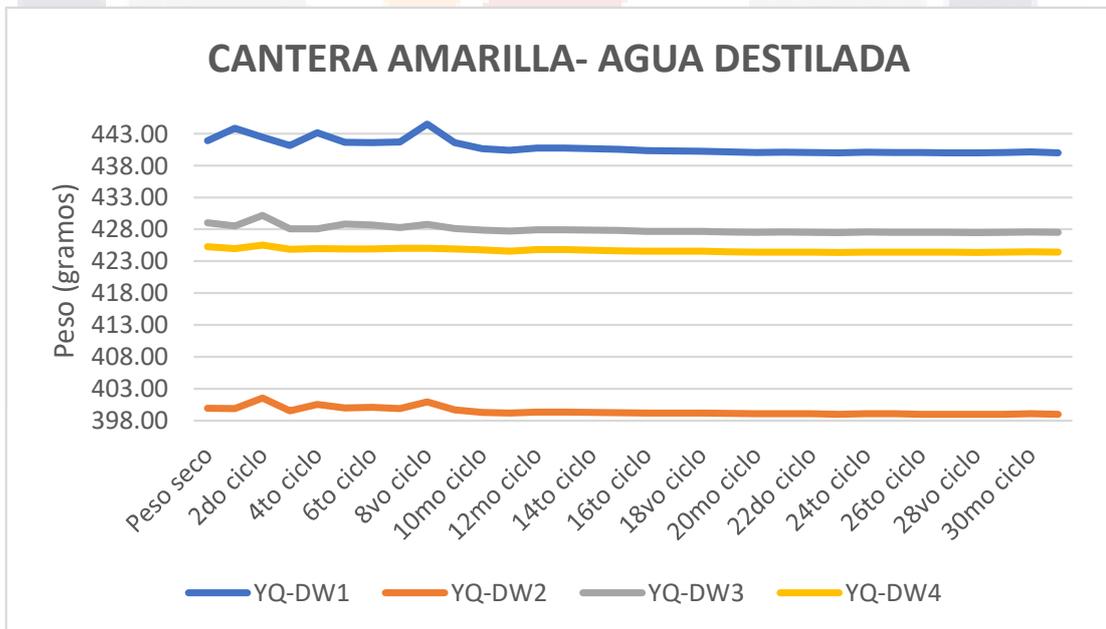


Figura 43. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua destilada. Cantera amarilla. Elaboración propia.

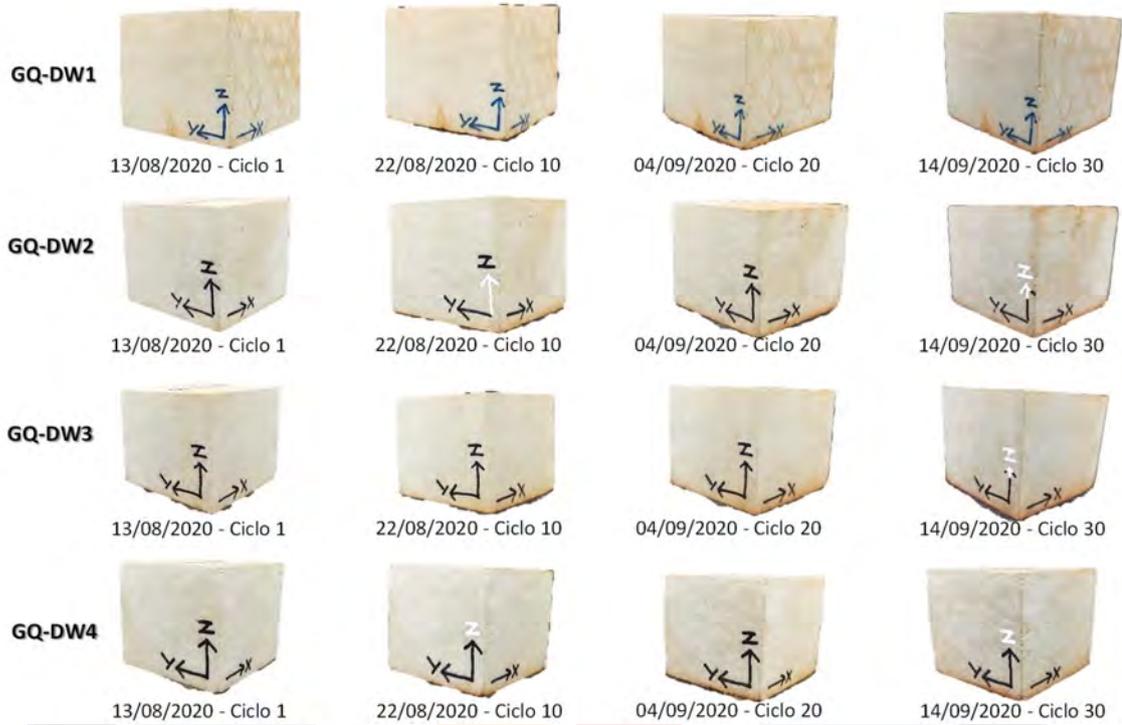


Figura 44. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera verde en agua destilada. Elaboración propia.

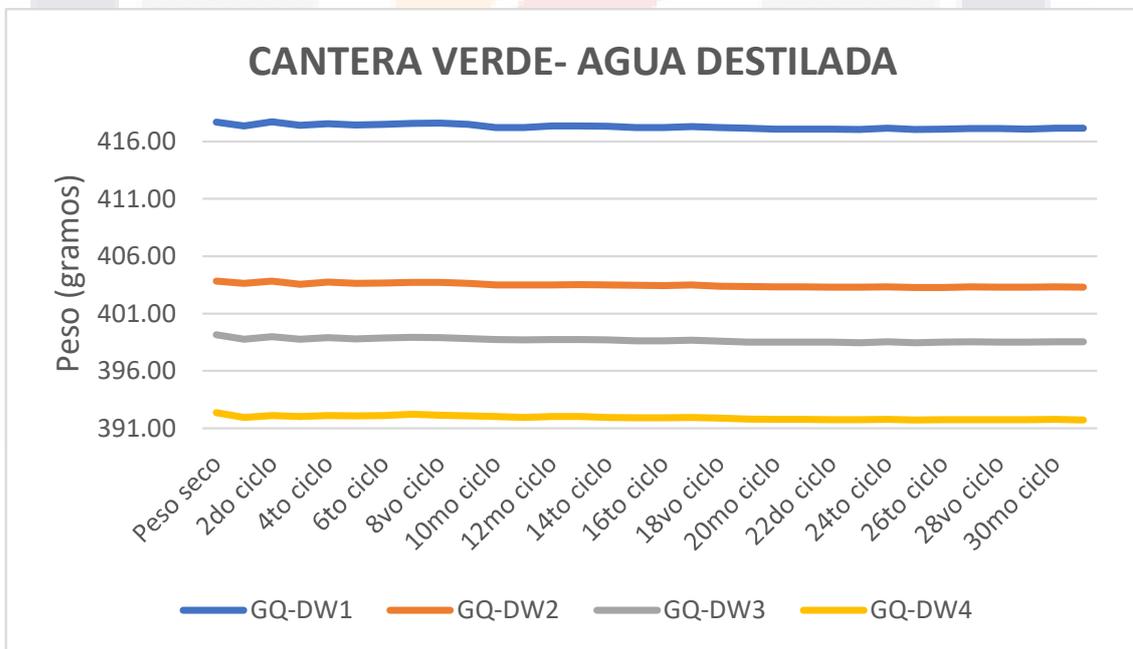


Figura 45. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua destilada. Cantera verde. Elaboración propia.

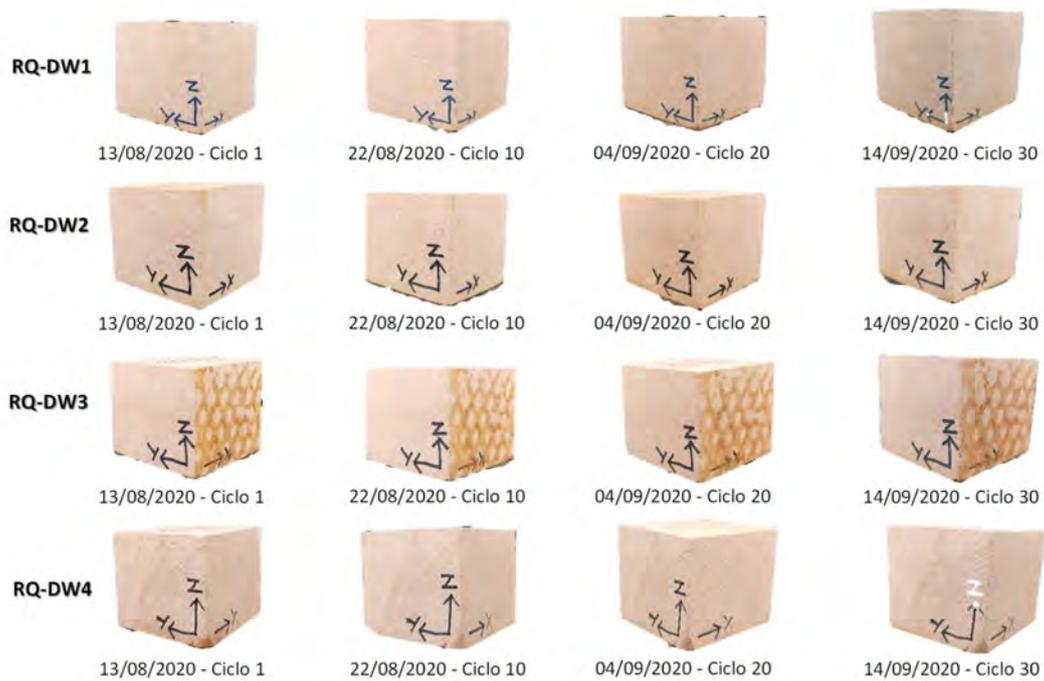


Figura 46. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera roja en agua destilada. Elaboración propia.

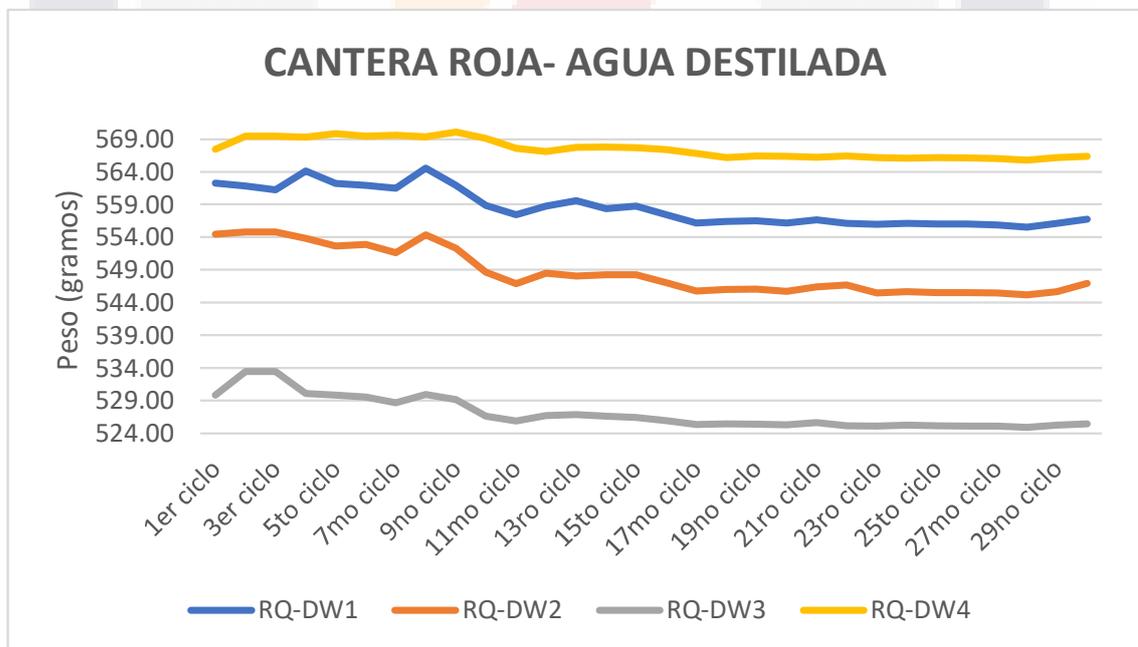


Figura 47. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua destilada. Cantera roja. Elaboración propia.

Agua de lluvia

Las muestras sometidas a este tipo de agua tampoco mostraron cambios físicos en su composición (Figuras 48, 50 y 52) y tuvieron variaciones de peso promedio para la cantera amarilla de -1.08 grs. (Figura 49), para la cantera verde de -0.60 grs. (Figura 51) y para la cantera roja de -2.58 grs. (Figura 53). La tendencia para estas muestras fue con valles y crestas en los primeros ciclos, por ejemplo, para la cantera amarilla se presentaron estas fluctuaciones en pérdida y ganancia de peso hasta el ciclo 10 y posterior a este se presenta una tendencia lineal.

Para la cantera verde estas variaciones solo se dieron hasta el ciclo 6 y posteriormente adoptaron una tendencia continua y para la cantera roja hasta después del ciclo 14 se observa una tendencia lineal en la gráfica.

Nuevamente se repite la tendencia de pérdida de peso con mayor pérdida para la cantera roja seguida de la cantera amarilla y la que menos peso pierde es la cantera verde.



Figura 48. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera amarilla en agua de lluvia. Elaboración propia.

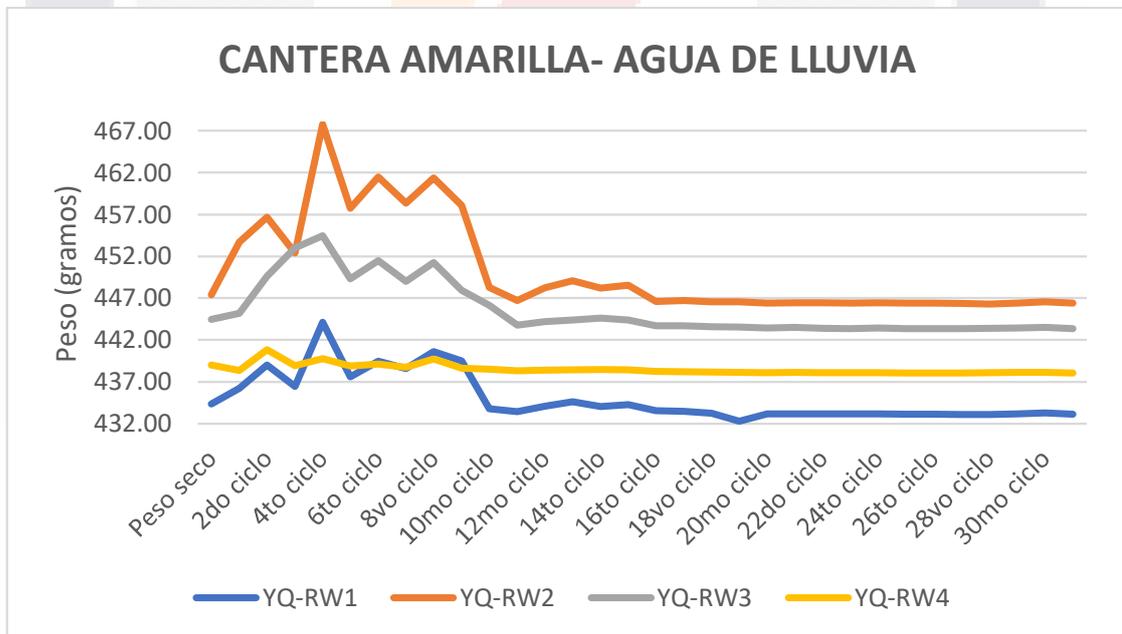


Figura 49. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua de lluvia. Cantera amarilla. Elaboración propia.



Figura 50. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera verde en agua de lluvia. Elaboración propia.

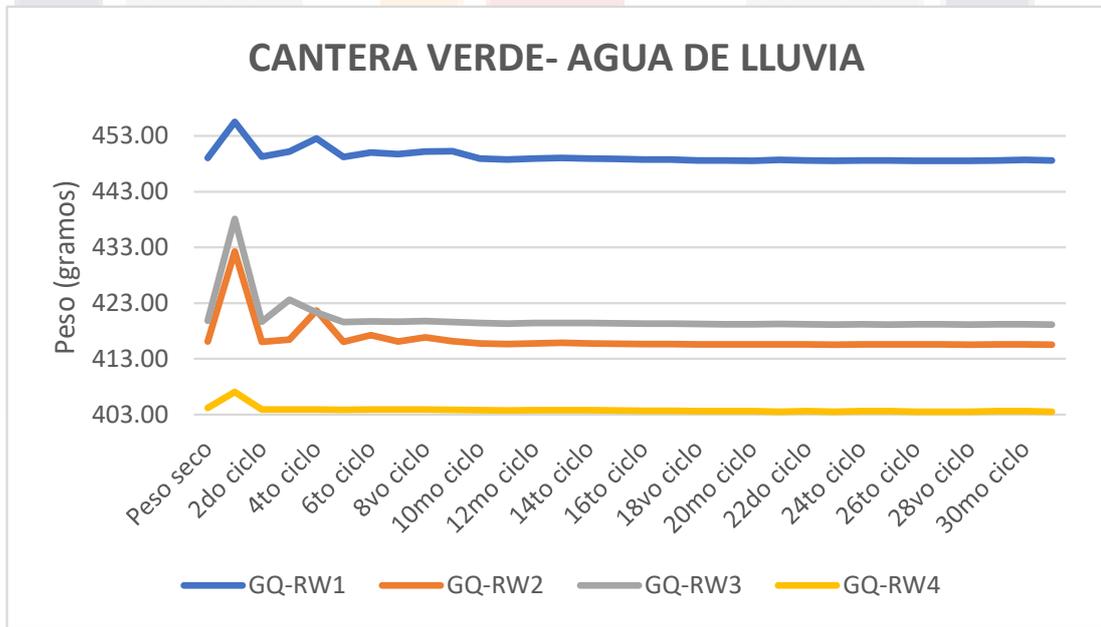


Figura 51. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua lluvia. Cantera verde. Elaboración propia.



Figura 52. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera roja en agua de lluvia. Elaboración propia.

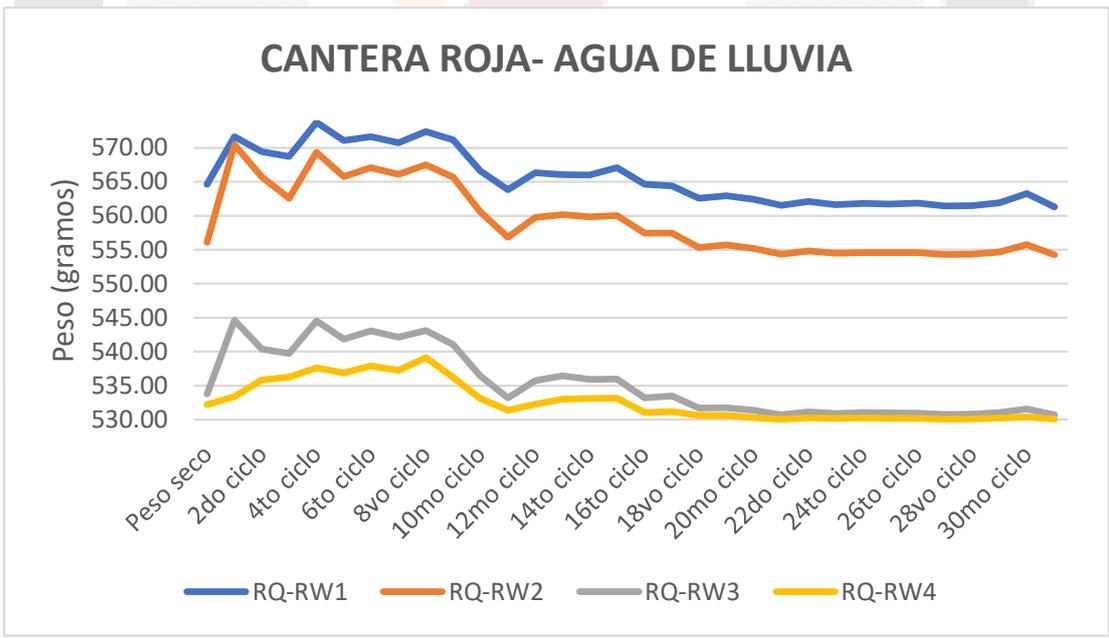


Figura 53. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua lluvia. Cantera roja. Elaboración propia.

Agua de lluvia ácida

Las muestras sometidas a este tipo de agua tuvieron la variante que se media el nivel de pH del agua previo a la sumersión de las rocas y posterior a su ciclo de saturación ya que esta agua se realizaba de manera artificial y tenía que conseguirse un pH de 4 o 4.5 para que fuera considerado ácido, se encontraba que al finalizar el ciclo de sumersión el agua tenía un pH de entre 7 o 7.5 lo que significa que la cantera tenía un efecto de alcalinización en el agua. Físicamente las rocas no mostraron cambios aparentes importantes (Figuras 54, 56 y 58) solo variaciones en las tonalidades para la cantera verde y amarilla que se volvió un poco más oscura con algunos tonos rojo-anaranjados probablemente se deba a la oxidación de sus minerales.

Todas las muestras tuvieron pérdida de peso posterior a los ciclos, repitiéndose el patrón que se presentó para el agua destilada y de lluvia donde la cantera roja perdió un promedio de -2.94 grs. (Figura 59), la cantera verde -0.63 grs. (Figura 57) y la cantera amarilla -1.01 grs. (Figura 55).

La cantera amarilla presenta en la gráfica valles y crestas y se estabiliza a partir del ciclo 10, la cantera verde permanece bastante lineal a lo largo de todos los ciclos y la cantera roja presenta variaciones en el 3er y 10mo ciclo.

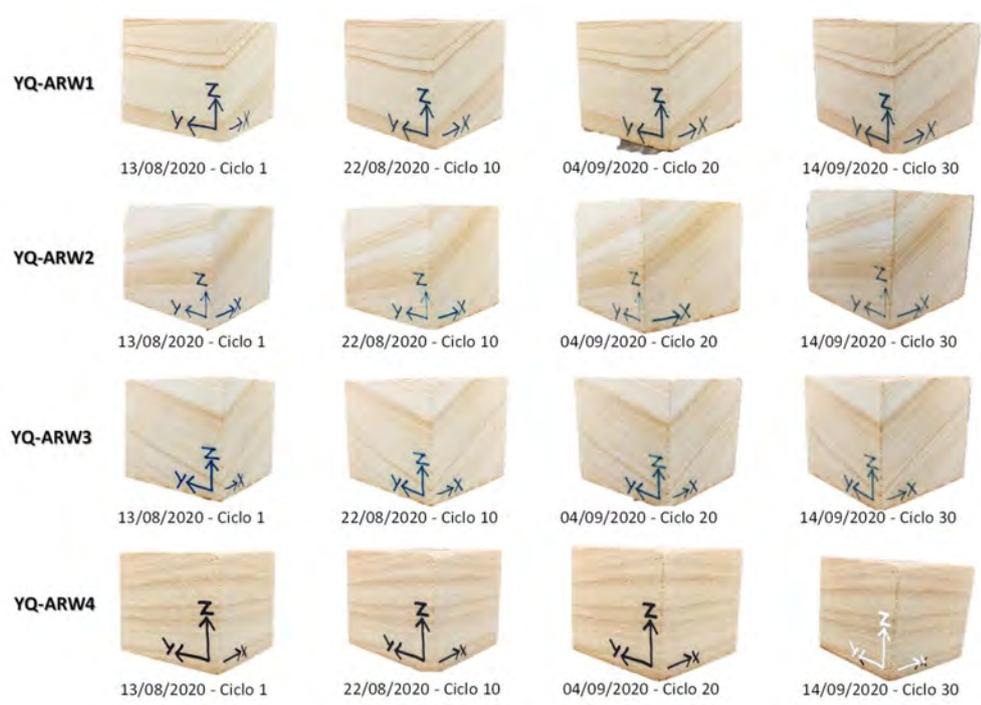


Figura 54. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera amarilla en agua lluvia ácida. Elaboración propia.

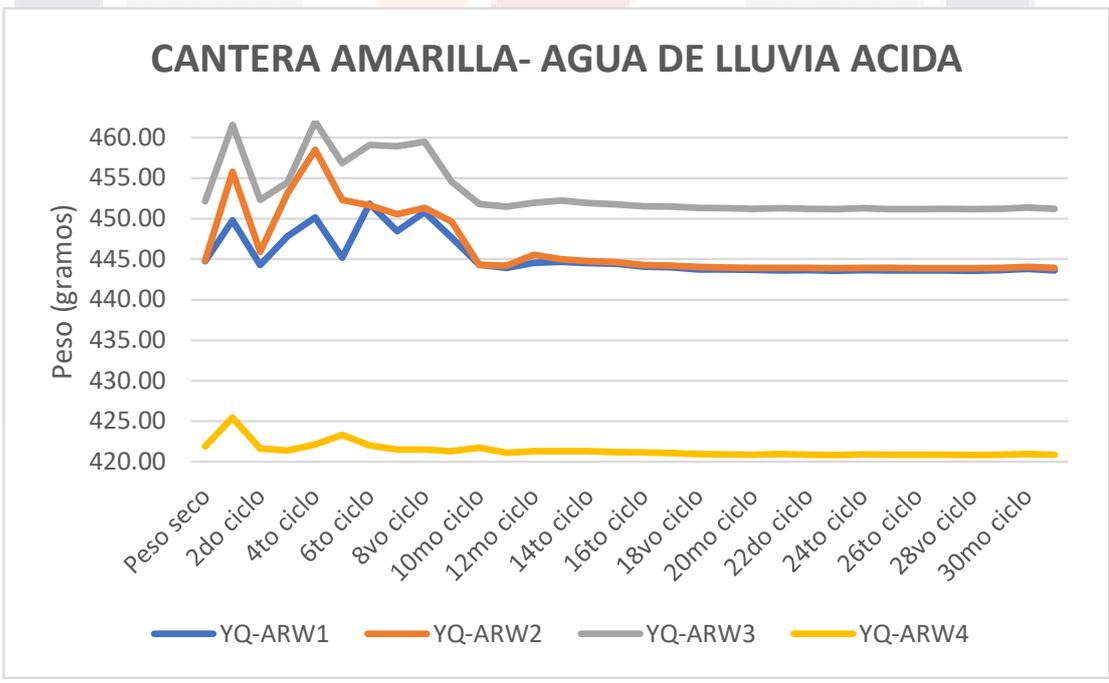


Figura 55. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua lluvia ácida. Cantera amarilla. Elaboración propia.



Figura 56. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera verde en agua lluvia ácida. Elaboración propia.

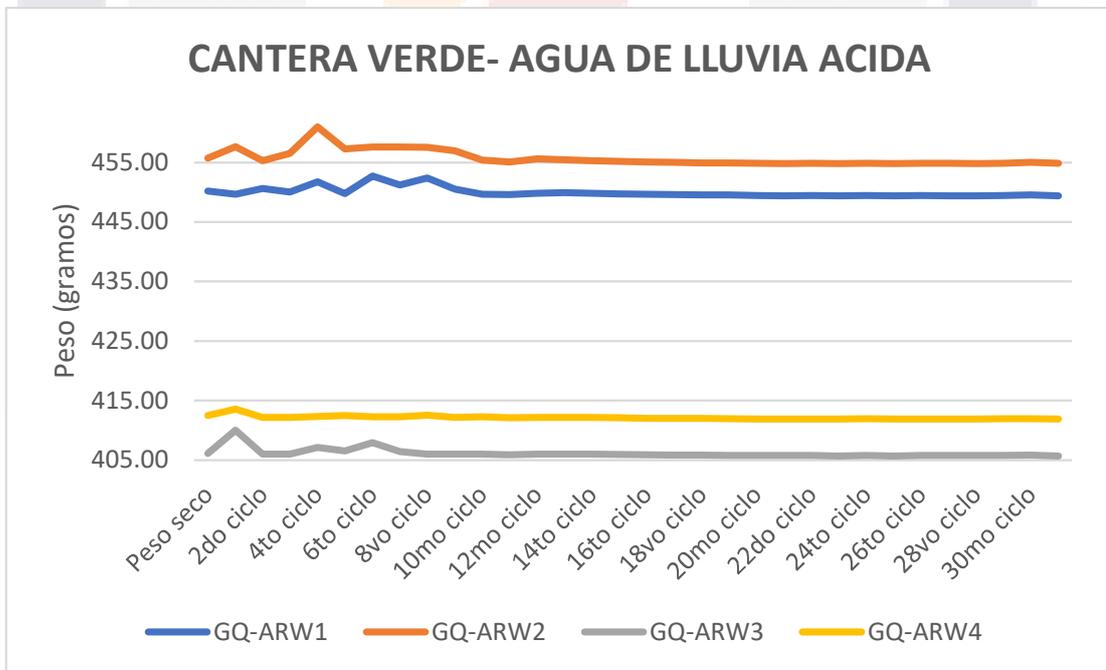


Figura 57. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua lluvia ácida. Cantera verde. Elaboración propia.



Figura 58. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera roja en agua lluvia ácida. Elaboración propia.

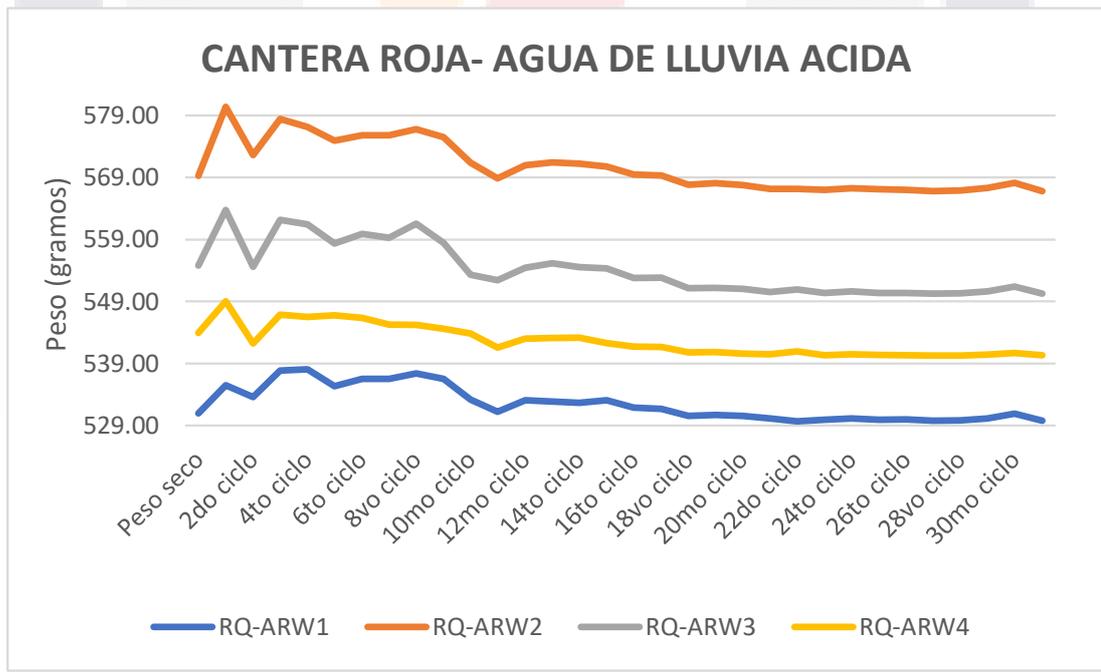


Figura 59. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua lluvia ácida. Cantera roja. Elaboración propia.

Agua tratada

Las muestras sometidas a ciclos con agua tratada mostraron una tendencia a ganar un porcentaje de su peso original que fue para la cantera amarilla de +0.0765 grs. (Figura 61), para la cantera verde de +0.1529 grs. (Figura 63), y para la cantera roja de +0.0580 grs. (Figura 65) . Aunque no es una ganancia de peso significativa es interesante señalar que este aumento de peso no se dió en los experimentos usando otros tipos de agua.

Si recordamos el tamaño promedio de poro podemos correlacionar que a mayor tamaño de poro mayor ganancia de peso tuvieron las rocas lo que puede indicar que un componente del agua tratada está quedando atrapado en estos poros.

Las muestras de roca sometidas al agua tratada tuvieron un comportamiento bastante lineal y continuo.

Un espécimen de las muestras amarillas (YQ-TW4), verdes (GQ-TW4) y rojas (RQ-TW4) tuvieron que suspender el experimento en el ciclo 19 debido a que se necesitaban para realizar las pruebas de compresión simple.

Fisicamente estas rocas tampoco muestran alteraciones significativas (Figuras 60, 62 y 64).



Figura 60. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera amarilla en agua tratada. Elaboración propia.

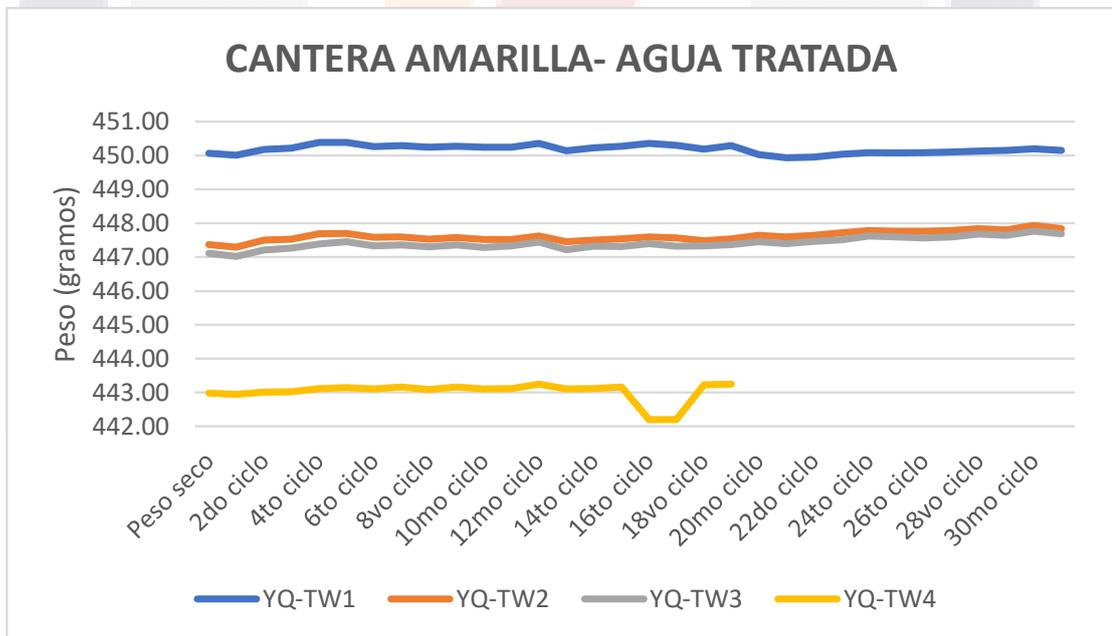


Figura 61. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua tratada. Cantera amarilla. Elaboración propia.



Figura 62. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera verde en agua tratada. Elaboración propia.

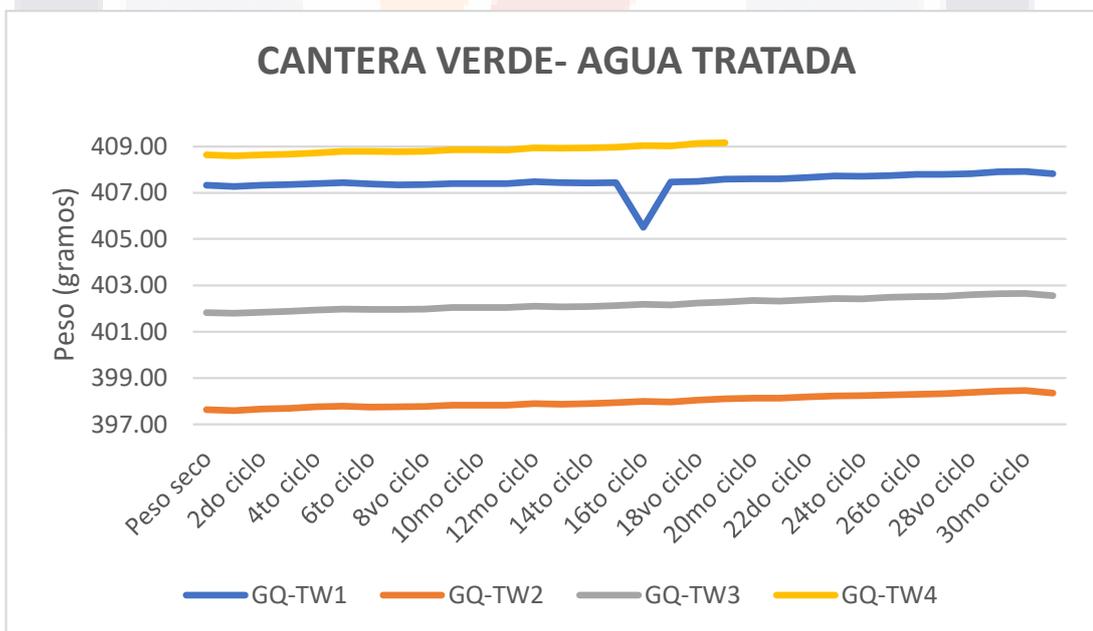


Figura 63. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua tratada. Cantera verde. Elaboración propia.



Figura 64. Ciclos de saturación- desecación con muestras de cantera roja en agua tratada. Elaboración propia.

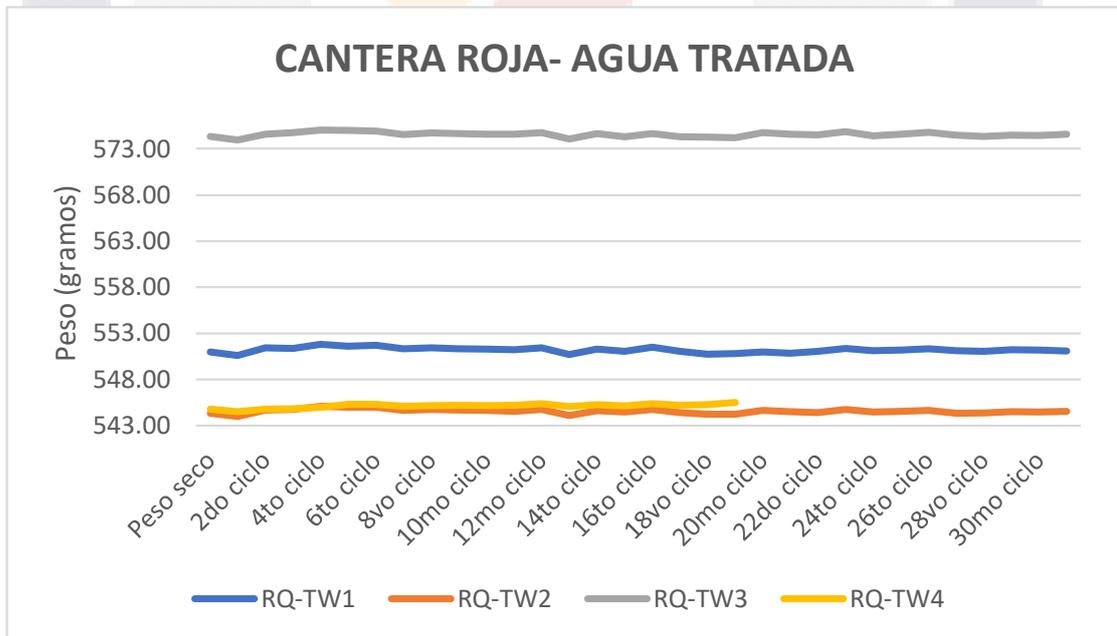


Figura 65. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua tratada. Cantera roja. Elaboración propia.

Agua Na₂SO₄.

Los experimentos realizados con agua saturada de sales nos muestran el efecto destructivo que se logra en las muestras de cantera.

Se da por terminado el experimento cuando la roca pierde un 30% de su peso original, y durante los primeros ciclos se puede observar un incremento en el peso como consecuencia de la introducción de sal en los poros.

Finalizado el ensayo, se procedió al lavado de las sales con agua destilada, esto para determinar la pérdida de peso neto de las muestras.

Para las canteras amarillas la duración promedio fue de entre 7 y 8 ciclos (Figuras 66 y 67), la cantera verde (Figuras 68 y 69) presentó 2 muestras (GQ-N Na₂SO₄ 1, GQ- Na₂SO₄ 2) que al ciclo 30 perdieron el 13% y el 21% respectivamente sin llegar a degradarse completamente las 2 muestras restantes (GQ-N Na₂SO₄ 3, GQ- Na₂SO₄ 4) se deleznaron en los ciclos 16 y 17, finalmente la cantera roja (Figuras 70 y 71) tuvo 2 muestras (RQ-N Na₂SO₄ 2, RQ- Na₂SO₄ 3) que duraron 17 ciclos 1 muestra (RQ-N Na₂SO₄ 1) que hasta el ciclo 30 perdió el 30% de su peso original y 1 muestra (RQ-N Na₂SO₄ 4) que solo duró 6 ciclos.

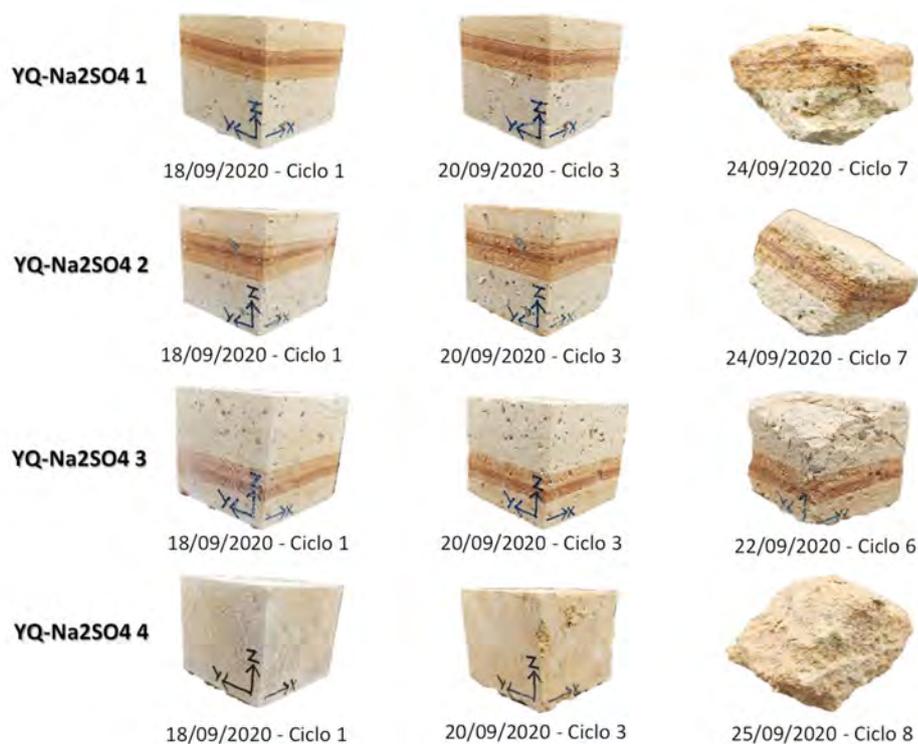


Figura 66. Ciclos de saturación- desecación con muestras saturadas de Na₂So4. Cantera amarilla. Elaboración propia.

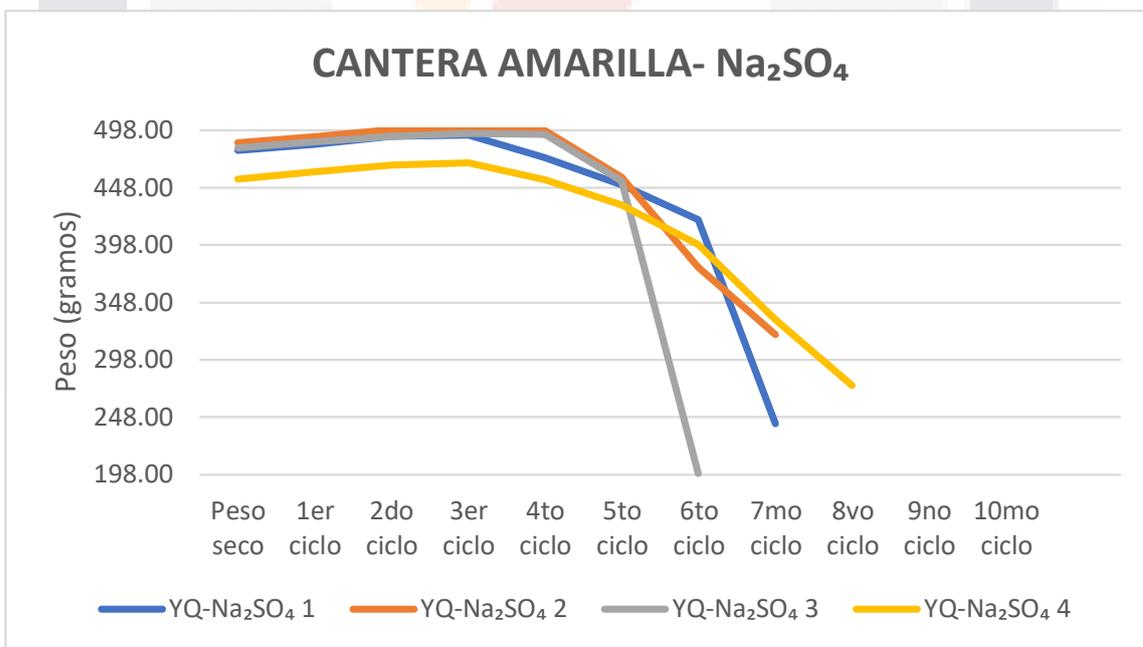


Figura 67. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua saturada de Na₂SO₄. Cantera amarilla. Elaboración propia.

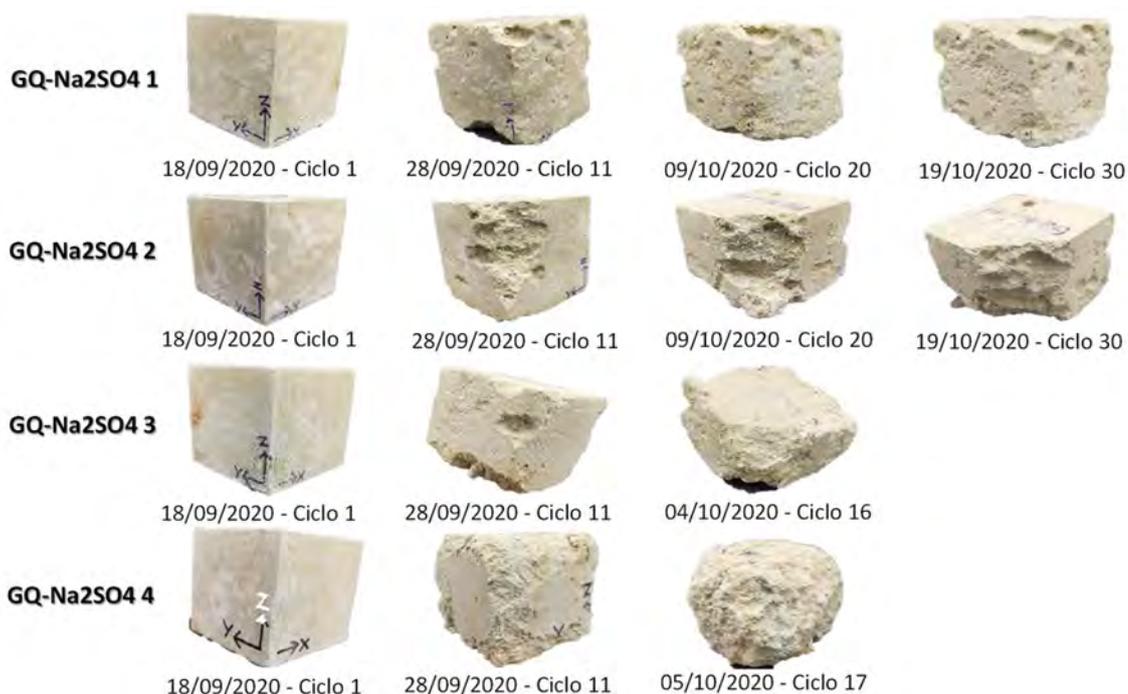


Figura 68. Ciclos de saturación- desecación con agua saturada de Na₂SO₄ en muestras de cantera verde. Elaboración propia.

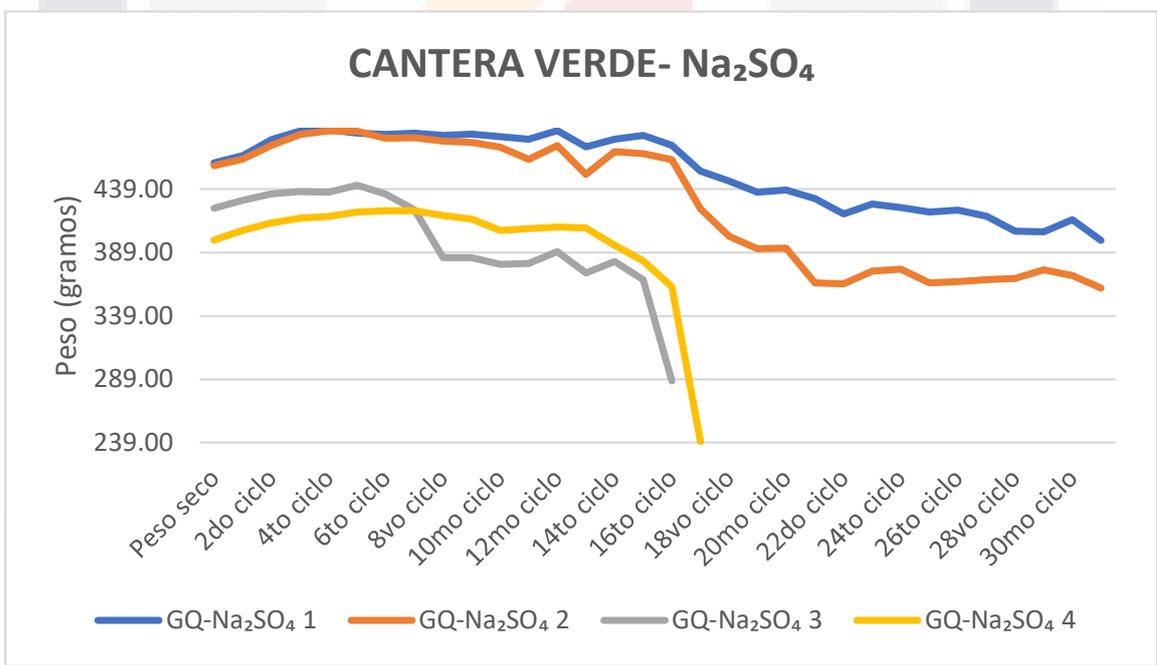


Figura 69. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua saturada de Na₂SO₄. Cantera verde. Elaboración propia.

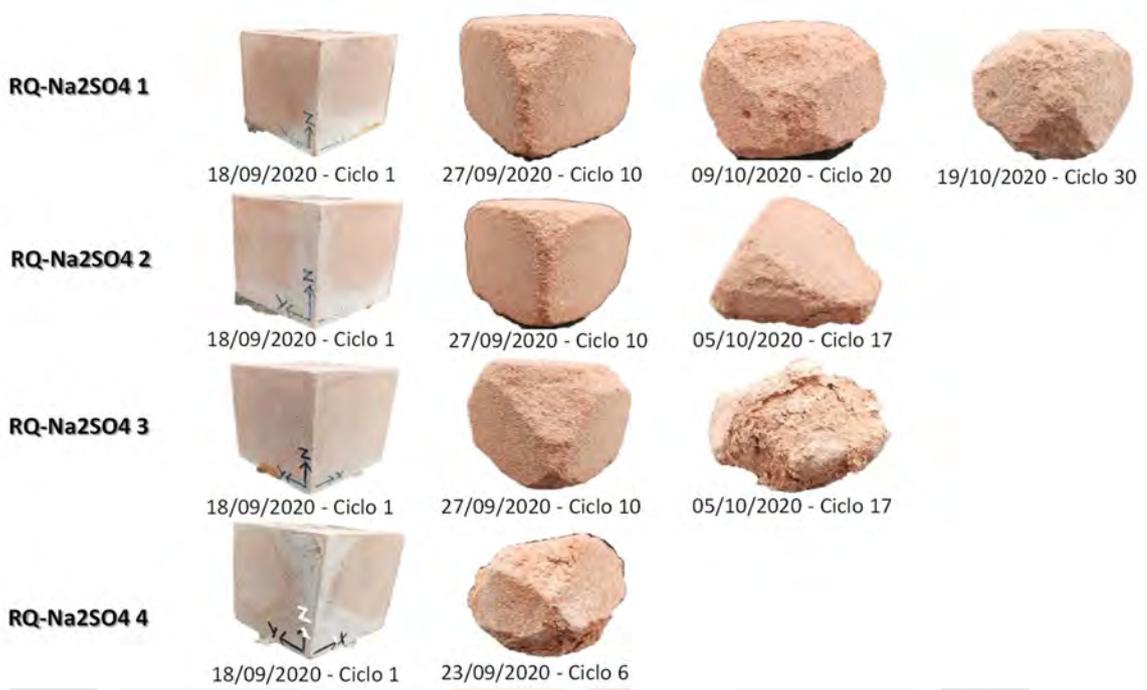


Figura 70. Ciclos de saturación- desecación con agua saturada de Na₂SO₄ en muestras de cantera roja. Elaboración propia.

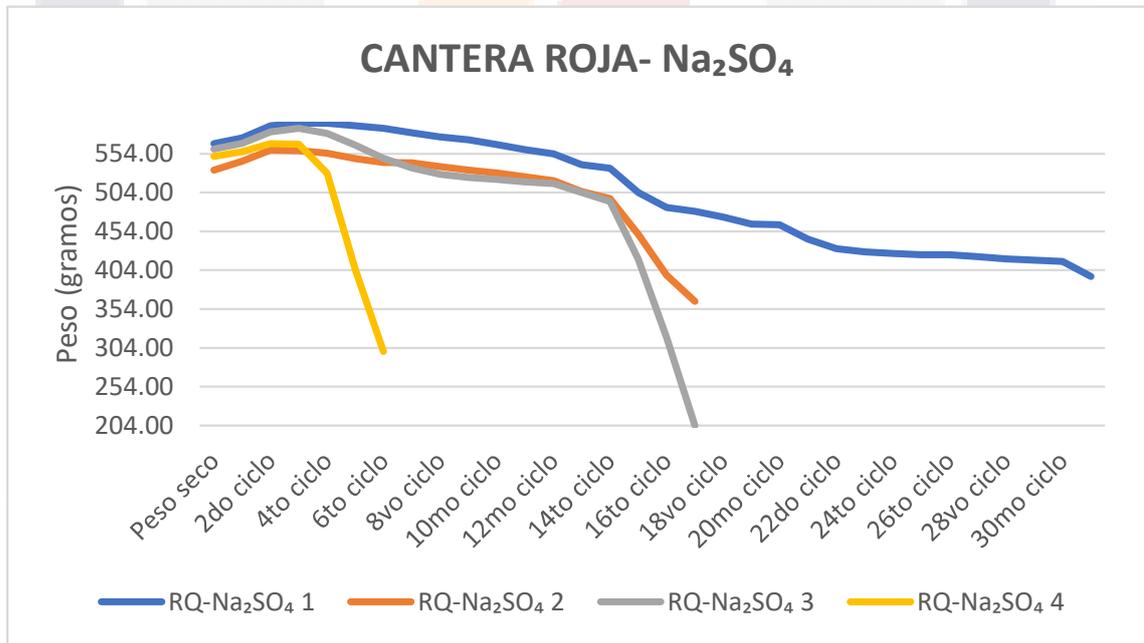


Figura 71. Variaciones en peso (grs.) a lo largo de 30 ciclos con agua saturada de Na₂SO₄. Cantera roja. Elaboración propia.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

Se mencionan las siguientes conclusiones con base en los resultados obtenidos en los diferentes experimentos realizados, esto relacionado a los objetivos planteados al inicio de la investigación.

6.1 Conclusión General

Las muestras de cantera de la presente investigación sometidas a experimentos de saturación-desección utilizando agua con distinto grado de contaminación, mostraron tener una alta resistencia al desgaste ya que al ser un material altamente permeable permite que el líquido fluya de manera fácil a través de su red porosa lo que conlleva a que su deterioro sea bajo, así mismo se demuestra que aquellas rocas sometidas a ciclos con agua tratada incrementan su cohesión lo que indica una consolidación del material.

La presente investigación nos muestra que los procesos de cristalización por sales son un método de destrucción para la roca muy superior que aquellos que puedan presentarse naturalmente, este fenómeno, no es observable en el largo plazo para las muestras sometidas a ciclos de saturación-desección utilizando aguas con diferentes niveles de contaminación, por lo que la hipótesis inicial se descarta.

6.2 Conclusiones Particulares

- A) Se analizaron diversos métodos seleccionándose como el método a utilizar el de cristalización por sales debido a que es un procedimiento sencillo y a la vez agresivo para evaluar la durabilidad de las rocas. Se encontró que los resultados están sujetos a la metodología experimental esto quiere decir a utilizar la temperatura adecuada, la saturación con Na_2SO_4 correcta y a respetar los tiempos de sumersión y secado de acuerdo con la norma utilizada.
- B) Se concluye que el uso de agua con saturación de Na_2SO_4 al 10% provoca el crecimiento cristalino dentro de la red porosa del material pétreo alterando sus propiedades físicas como peso, porosidad y capacidad de absorción, mostrando

que la cantera verde es la que más ciclos soporta (30) seguida de la cantera roja (17) y la que menos ciclos soportó fue la amarilla (7).

En este punto es importante mencionar que, aunque la cantera amarilla y verde tienen un porcentaje de porosidad efectiva similar 38% y 36% respectivamente lo cual teóricamente indicaría que su resistencia a los ciclos salinos debería ser similar y no lo es, se deduce que el tamaño promedio de poro es un factor determinante en estos experimentos ya que la cantera amarilla presenta 0.10 μm vs., 0.18 μm de la cantera verde lo que ocasiona que la red porosa de la cantera verde tenga un mejor flujo del líquido y no se queden tantas partículas de sal dentro de la roca como en la cantera amarilla.

Para la cantera roja se presentaron resultados previsible en cuanto a su deterioro soportando esta un promedio de 17 ciclos presentando una porosidad efectiva de 24%. La cantera roja al tener mayor cantidad de microporos hace más difícil que el agua saturada de sulfato circule a través de su red porosa y en consecuencia, aunque la sal si cristaliza dentro de la roca, el tamaño promedio de poro hace que el espacio que tiene la sal para crecer sea más reducido esto explica por qué esta roca tiende a soportar tantos ciclos de cristalización y también puede explicar porque su proceso de desgaste se da en forma de desmoronamiento.

El agua utilizada en los procesos para cristalización por sales presenta una supersaturación al contener un 10% de sulfatos en su composición porcentaje que no es comparable con algún tipo de agua presente en condiciones naturales ya que incluso el agua de mar solo presenta un promedio de 3.9% como grado de saturación máxima.

Si en el fenómeno de cristalización de sales la roca presenta un aumento de peso de las muestras en los primeros ciclos es debido a la saturación de los poros con sulfato.

- C) En condiciones controladas de laboratorio la roca se sumerge completamente en las aguas contaminadas permitiendo que los elementos presentes en el agua se introduzcan de manera homogénea dentro de esta, situación que en los

edificios históricos es diferente ya que por lo general estos absorben agua a través de capilaridad.

Se concluye que no se presenta una manifestación de cristalización salina en aquellas muestras con aguas contaminadas ya que el fenómeno de nucleación (crecimiento cristalino) no es observable, esto debido a que la concentración de sulfatos en la muestra es baja y esto no permite la formación de cristales lo que conlleva a que no exista en el poro presión de cristalización.

Las muestras sometidas a ciclos con agua destilada tienen una tendencia a limpiar aquellos restos de materia que no son propios de la roca, es un tipo de agua que no muestra una tendencia a dañar la roca de manera alguna.

Las muestras sometidas a ciclos con agua de lluvia, aunque presentan fluctuaciones de pesos en los primeros ciclos, después se estabilizan lo que podría indicar que igualmente en el largo plazo este tipo de agua tiende a retirar impurezas de la roca.

Las muestras sometidas a ciclos con agua de lluvia ácida recreada en laboratorio presentan las mismas fluctuaciones de peso que las muestras con agua de lluvia, la cantera tiende a alcalinizar el pH del agua.

El agua tratada es interesante ya que presenta un comportamiento lineal, sin embargo, es la única muestra que presenta un aumento en el peso final de las rocas que es directamente proporcional al tamaño promedio de poro, a mayor tamaño de poro mayor ganancia de peso. Puede concluirse que el aumento de peso en aquellas muestras sometidas al agua tratada nos indica que los poros están siendo saturados con algún elemento propio de este tipo de agua, posiblemente grasas o materia orgánica que no se encuentran presentes en otros tipos de agua.

Se observa una tendencia que demuestra que la cantera que más peso pierde al someterse a ciclos con aguas contaminadas es la de color rojo y la verde es la que menos peso pierde esto podría indicar que aquella roca que tiende a acumular más suciedad proveniente de factores externos es la de color rojo.

6.3 Nichos de Investigación

Es importante estudiar la presencia en el agua de carbonatos, silicatos, nitratos y sulfatos durante dos momentos dentro del experimento, el primero cuando el agua aún no ha sido utilizada para los ciclos en las rocas y posterior a ciclos de saturación-deseccación, se puede sugerir realizarlo en el caso de ser 30 ciclos en los periodos 10, 20 y 30 del experimento, esto con la finalidad de evaluar si existen elementos del agua que puedan quedarse en la roca o por otro lado que la roca ceda algunos elementos minerales al agua. Estos análisis pueden llevar a plantear nuevas hipótesis para futuras investigaciones.

Los fenómenos de absorción de agua deben ser estudiados y analizados mediante el experimento de saturación por capilaridad, con la finalidad de asemejar lo más posible este proceso a lo que sucedería con los edificios patrimoniales.

Analizar los cambios en la química del agua para el nivel de acidez y cambios en el pH, para determinar si los minerales de la roca neutralicen el pH de la lluvia ácida.

Estudiar la propagación de ondas ultrasónicas para correlacionarlos con sus propiedades de resistencia a la compresión con estos datos puede darse estimadores de durabilidad en las rocas para cada tipo de agua.

Se debe realizar un análisis exhaustivo de las propiedades de la roca en sus aspectos minerales, petrológicos y petrofísicos previo a ser sometidas a ciclos de saturación así como posterior a ellos, se recomienda realizar un estudio con microscopio petrográfico por medio de láminas delgadas y un análisis geoquímico, esto con la finalidad de comparar y correlacionar estos resultados con el porcentaje de degradación que presenten los materiales y poder conocer si el agua que circula por la red porosa pueda modificar los minerales inherentes de las rocas.

Estudiar las propiedades geotécnicas de las rocas previo y post ciclos con la finalidad de conocer si se altera su grado de soldamiento y con ello determinar si esto genera los cambios en los parámetros de resistencia a la compresión.

lo que nos hace concluir que los fenómenos observados en la presente investigación deben ser observados y analizados mediante el experimento de saturación por capilaridad, con la finalidad de asemejar lo más posible este proceso a lo que sucedería con los edificios patrimoniales.

Se debe realizar el ensayo de compresión uniaxial tomando en cuenta varios planos de discontinuidad ya que las propiedades cohesivas van a depender de la dirección en que son medidos.

Finalmente se sugiere realizar pruebas de cristalización con sales a aquellas probetas que sean sometidas a ciclos con agua tratada con la finalidad de observar si estas resisten mas ciclos que aquellas inalteradas.



REFERENCIAS

- Alencar, A. T. S. de. (2014). *Resistencia Anisótropa de las Rocas*.
- Alonso, F. J., Ordaz, J., Valdeón, L., & Esbert, R. M. (1987). Revisión crítica del ensayo de cristalización de sales. *Materiales de Construcción*, 37(206), 53–60. <https://doi.org/10.3989/mc.1987.v37.i206.870>
- Alonso Rodríguez, F., Esbert Alemany, R., Ordaz Gargallo, J., & Vázquez, P. (2006). Análisis del deterioro en los materiales pétreos de edificación. *Revista Electrónica ReCoPaR*, 3, 23–32.
- Alonso Rodríguez, F. J. (2004). El Agua en los Materiales Rocosos. *Carreteras, SUPPL.*, 228–261.
- ANÁLISIS DE AGUA-DETERMINACIÓN DE ACIDEZ Y ALCALINIDAD EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS-MÉTODO DE PRUEBA, (2001).
- ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE CLORUROS TOTALES EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA, (2001).
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166789/NMX-AA-073-SCFI-2001.pdf>
- ANÁLISIS DE AGUAS - DETERMINACIÓN DE NITRATOS EN AGUAS NATURALES, POTABLES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA. (2001).
- Arnold, A., & Kueng, A. (1985). Crystallization and habits of salt efflorescences on walls. Part I: methods of investigation and habits. *Undefined*.
- Behera, S., Mallick, B., Rautray, T. R., Tiwari, T. N., & Mishra, P. C. (2014). Experimental Investigations of Simulated Acid Rain Affected Brahmi. *Advanced Science Letters*, 20(3), 862–867.
<https://doi.org/10.1166/asl.2014.5411>
- Benavente, D. (2007). La cristalización de sales como mecanismos de deterioro en rocas usadas en el patrimonio arquitectónico. *Ciencia, Tecnología y Sociedad Para Una Conservación Sostenible Del Patrimonio Pétreo*, 33–40.

- Benavente, D., Cultrone, G., & Gómez-Heras, M. (2008). The combined influence of mineralogical, hygric and thermal properties on the durability of porous building stones. *European Journal of Mineralogy*, 20(4), 673–685.
<https://doi.org/10.1127/0935-1221/2008/0020-1850>
- Benavente García, D. (2002). Modelización y estimación de la durabilidad de materiales pétreos porosos frente a la cristalización de sales [Universidad de Alicante]. In *Universidad de Alicante. Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias*.
<http://www.cervantesvirtual.com/FichaObra.html?Ref=12011&ext=pdf>
- Branner, J. C. (1906). The Linear Force of Growing Crystals, and an Interesting Pseudo-Solid . G. F. Becker , A. L. Day . *The Journal of Geology*, 14(2), 162–164. <https://doi.org/10.1086/621292>
- Charola, A. E. (2000). Salts in the deterioration of porous materials: an overview. *Journal of the American Institute for Conservation*, 39(3), 327–343.
<http://cool.conservation-us.org/coolaic/jaic/articles/jaic39-03-002.html>
- ISO 15148:2002 - Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of water absorption coefficient by partial immersion, (2002).
<https://www.iso.org/standard/26500.html>
- DIN 52111:1990-03 TESTING OF NATURAL STONES; CRYSTALLISATION TEST, (1990). https://infostore.saiglobal.com/en-us/Standards/DIN-52111-1990-403197_SAIG_DIN_DIN_913784/
- DIN 66133:1993-06 Determination of pore volume distribution and specific surface area of solids by mercury intrusion, (1993). https://infostore.saiglobal.com/en-us/Standards/DIN-66133-1993-383716_SAIG_DIN_DIN_872017/
- DIN EN 772-4: Methods of test for masonry units- Part 4: Determination of density and bulk density and total porosity of bricks made of natural stone, (1998).
- Everett, D. H. (1961). The thermodynamics of frost damage to porous solids. *Transactions of the Faraday Society*, 57(0), 1541–1551.
<https://doi.org/10.1039/TF9615701541>
- Feijoo, E. P. (2020). LA RESISTIVIDAD DE ROCAS Y SU RELACIÓN CON LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE EN MINA. *UNIVERSIDAD,*

CIENCIA Y TECNOLOGÍA, 24(99), 61–67.

<https://www.uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/296/526>

Fonseca Monzón, M. J. (2018). *Caracterización de la degradación de las propiedades mecánicas de la mampostería por efecto del intemperismo*. Universidad Autónoma de Aguascalientes.

González, L. (2018). *Pueblo en vilo: microhistoria de San José de Gracia* (El colegio). Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes.

<http://www.cervantesvirtual.com/obra/pueblo-en-vilo-microhistoria-de-san-jose-de-gracia-889091/>

Grossi, C. M., & Esbert, R. M. (1994). Las sales solubles en el deterioro de rocas monumentales. Revisión bibliográfica. *Materiales de Construcción*, 44(235), 15–30. <https://doi.org/10.3989/mc.1994.v44.i235.579>

Hach Lange. (2017). Manual de técnicas analíticas para agua. *Manual de Técnicas Analíticas, Tabla 1*, 1–14. <http://fleyccorp.com/wp-content/uploads/2017/12/Manual-técnicas-analíticas-Hach-Lange.pdf>

Kueck, A. (2019). *Weathering behaviour and petrophysical properties of volcanic tuff as historical building stone in Oaxaca , Mexico*. July.

Lavalle. (1853). *Recherches sur la formation lente des cristaux á la température ordinaire* (pp. 493–495).

MEDICIÓN DEL ION SULFATO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS-MÉTODO DE PRUEBA-, (2014).

Molina Maldonado, S. A. (2016). *Estudios geológicos, petrográficos, geoquímicos y geotécnicos en las rocas de construcción del centro histórico de Santiago de Querétaro y su comportamiento al intemperismo* [Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. <http://ninive.uaslp.mx/jspui/handle/i/4137>

Nielsen, V. A. E. (1964). Kinetics of Precipitation. VonA. E. Nielsen. International Series of Monographs on Analytical Chemistry. Haupt-Herausg.R. Belcher undL. Gordon. Vol. 18. Pergamon Press, Oxford-London-Edinburgh-New York-Paris-Frankfurt 1964. 1. Aufl., X, 153 S., zahlr. Abb. *Angewandte Chemie*, 77(16), 745–745. <https://doi.org/10.1002/ange.19650771678>

Ordaz, J., & Esbert, R. M. (1988). Glosario de términos relacionados con el

deterioro de las piedras de construcción. *Materiales de Construcción*, 38(209), 39–45. <https://doi.org/10.3989/mc.1988.v38.i209.847>

Platz, T. V. (2014). *Werksteine im Saale-Unstrut-Gebeit: Bauschäden, Verwitterungscharakteristik und gesteintechnische Eigenschaften Masterbeit*. Universität Göttingen, Deutschland.

Prada, J. L., Valenciano, A., & Navarro, A. (1996). Procesos de alteracion de materiales pétreos en edificios de interés histórico. *Acta Geologica Hispánica*, 30(1–3), 97–110.

Puente Chicalote, testigo fiel de la historia del antiguo Aguascalientes | El Heraldo de Aguascalientes. (2018, October). *El Heraldo Aguascalientes*. <https://www.heraldo.mx/puente-chicalote-testigo-fiel-de-la-historia-del-antiguo-aguascalientes/>

R.I.L.E.M. (1980). *Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement*. *Matériaux et Constructions*. (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux systèmes de construction et ouvrages.

R.J. Schaffer. (2015). *The Weathering of Natural Building Stones*. Routledge. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=AdtqCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq="The+Weathering+of+Natural+Building+Stones".+&ots=4qOjUdmDcf&sig=4HysqnZqd8zycSVuzYEJs-6iKLo#v=onepage&q="The Weathering of Natural Building Stones".&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=AdtqCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=)

Ramírez-López, E. M., Thalasso, F., & Guerrero-barrera, A. L. (2011). Evaluación De Contaminantes En Agua Y Sedimentos Del Río San Pedro En El Estado De Aguascalientes. *Universidad y Ciencia*, 27(1), 17–32. <https://doi.org/10.19136/era.a27n1.137>

Ruedrich, J., & S., S. (2006). Fabric dependence of length change behaviour induced by ice crystallisation in the pore space of natural building stones - Dialnet. *Heritage, Weathering and Conservation*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6914709>

Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, M. del P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6ta ed., p. 634).

- Scherer, G. W. (1999). Crystallization in pores. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1347–1358. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00002-2)
- Siegesmund, S., & Snethlage, R. (2011). Stone in Architecture. In S. Siegesmund & R. Snethlage (Eds.), *Stone in Architecture* (4ta edició, pp. 227–316). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14475-2_4
- Stelzmann, M., Möller, U., & Plagge, R. (2015). *Water-Absorption-Measurement instrument for masonry façades*. <https://doi.org/10.1201/b19381-47>
- Taber, S. (1916). *The growth of crystals under external pressure* (pp. 532–556).
- Tlacotalpan se deteriora bajo el agua. (2010). *Informador MX*. <https://www.informador.mx/Cultura/Tlacotalpan-se-deteriora-bajo-el-agua-20100912-0107.html>
- Tremain, D. (2009). *Daños generados por el agua*.
- UNESCO. (1982). Declaración de México sobre Políticas Culturales. *Tetrahedron Letters*, 23(2), 6.
- Varila, J., & Díaz, F. (2008). *Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala laboratorio*. *Revista de tecnología*. Vol. 7. 2, 26 Pag. <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/document.pdf>
- Vitruvio Polion, M. L. (n.d.). *Los diez libros de arquitectura*.
- Wedekind, W., López-Doncel, R., Dohrmann, R., Kocher, M., & Siegesmund, S. (2013). Weathering of volcanic tuff rocks caused by moisture expansion. *Environmental Earth Sciences*, 69(4), 1203–1224. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2158-1>



		3	YQ-RW4	RQ-RW1	RQ-RW2	RQ-RW3	RQ-RW4	GQ-RW1	GQ-RW2	GQ-RW3	GQ-RW4	FECHA
			439.03	564.64	556.07	533.77	532.24	449.11	416.10	419.82	404.15	11/08/2020
1er ciclo	436.21	445.20	438.36	571.62	570.45	544.59	533.42	455.55	432.25	438.10	407.03	13/08/2020
			440.85	569.45	566.74	540.42	535.86	449.31	416.05	419.63	403.90	14/08/2020
3er ciclo	436.46	452.42	439.91	568.74	562.53	539.74	536.27	450.18	416.47	423.66	403.95	15/08/2020
			439.78	573.76	569.30	544.52	537.64	452.63	421.66	421.32	403.95	16/08/2020
5to ciclo	437.36	449.32	438.87	571.04	565.78	541.86	536.85	449.24	416.08	419.57	403.87	17/08/2020
			439.09	571.65	567.08	543.08	537.89	450.03	417.23	419.70	403.91	18/08/2020
7mo ciclo	438.56	448.97	438.76	570.73	566.07	542.15	537.25	449.71	416.15	419.64	403.93	19/08/2020
			439.74	572.41	567.48	543.12	539.12	450.16	416.86	419.79	403.94	20/08/2020
9no ciclo	439.51	448.07	438.62	571.17	566.67	541.05	536.21	450.26	416.17	419.61	403.85	21/08/2020
			438.55	566.58	560.59	536.44	533.12	448.97	415.77	419.42	403.76	22/08/2020
11mo ciclo	433.45	446.72	438.29	563.86	556.83	533.21	531.38	448.73	415.69	419.31	403.73	23/08/2020
			438.41	566.33	559.77	535.74	532.29	448.94	415.80	419.43	403.80	25/08/2020
13ro ciclo	434.61	449.06	438.44	566.02	560.18	536.42	533.05	449.05	415.83	419.45	403.79	26/08/2020
			438.47	565.98	559.85	535.92	533.11	448.92	415.79	419.44	403.78	27/08/2020
15to ciclo	434.29	448.57	438.44	567.06	560.01	536.00	533.15	448.86	415.73	419.36	403.72	29/08/2020
			438.25	564.64	557.45	533.22	531.07	448.78	415.69	419.30	403.66	30/08/2020
17mo ciclo	433.47	446.75	438.20	564.36	557.41	533.45	531.22	448.75	415.68	419.29	403.66	31/08/2020
			438.18	562.56	555.33	531.69	530.64	448.64	415.62	419.23	403.62	01/09/2020
19no ciclo	432.26	446.55	438.15	562.91	555.70	531.74	530.59	448.64	415.62	419.22	403.60	02/09/2020
			438.08	562.45	555.18	531.37	530.31	448.59	415.57	419.16	403.56	04/09/2020
21ro ciclo	433.17	446.46	438.13	561.52	554.36	530.74	530.07	448.66	415.62	419.25	403.55	05/09/2020
			438.07	562.12	554.81	531.13	530.25	448.60	415.59	419.16	403.56	06/09/2020
23ro ciclo	433.18	446.42	438.10	561.64	554.45	530.90	530.17	448.56	415.55	419.15	403.54	07/09/2020
			438.09	561.81	554.60	531.04	530.22	448.62	415.60	419.20	403.58	08/09/2020
25to ciclo	433.13	446.42	438.06	561.73	554.59	530.97	530.20	448.60	415.58	419.15	403.56	09/09/2020
			438.06	561.87	554.59	530.96	530.21	448.58	415.57	419.16	403.55	10/09/2020
27mo ciclo	433.08	446.39	438.04	561.42	554.31	530.78	530.08	448.59	415.57	419.17	403.55	11/09/2020
			438.07	561.49	554.37	530.83	530.11	448.56	415.56	419.15	403.53	12/09/2020
29no ciclo	433.16	446.44	438.11	561.91	554.70	531.05	530.24	448.62	415.58	419.19	403.56	13/09/2020
			438.12	563.22	555.76	531.61	530.39	448.70	415.61	419.21	403.57	14/09/2020
			438.06	561.31	554.24	530.74	530.12	448.61	415.56	419.12	403.50	15/09/2020
Maximo	444.11	467.80	440.85	573.76	570.45	544.59	539.12	455.55	432.25	438.10	407.03	
			438.04	561.31	554.24	530.74	530.07	448.56	415.55	419.12	403.50	

		β	YQ-ARW4	RQ-ARW1	RQ-ARW2	RQ-ARW3	RQ-ARW4	GQ-ARW1	GQ-ARW2	GQ-ARW3	GQ-ARW4	FECHA
1er ciclo	449.78	461.56	421.92	530.94	569.24	554.76	543.96	450.21	455.73	406.15	412.44	11/08/2020
			425.45	535.53	580.39	563.77	549.03	449.68	457.68	409.99	413.60	13/08/2020
3er ciclo	447.85	454.46	421.64	533.59	572.80	554.61	542.26	450.68	455.32	406.00	412.19	14/08/2020
			421.37	537.88	578.43	562.17	546.90	450.04	456.53	405.99	412.15	15/08/2020
5to ciclo	445.17	456.81	422.15	538.08	577.18	561.48	546.51	451.78	461.00	407.14	412.34	16/08/2020
			423.30	535.34	574.96	558.38	546.74	449.78	457.31	406.55	412.46	17/08/2020
7mo ciclo	448.47	458.96	422.01	536.54	575.79	559.89	546.35	452.77	457.98	407.91	412.30	18/08/2020
			421.52	536.52	575.83	559.27	545.29	451.19	457.63	406.43	412.26	19/08/2020
9no ciclo	447.64	454.55	421.49	537.41	576.79	561.53	545.23	452.44	457.57	406.01	412.56	20/08/2020
			421.35	536.52	575.53	558.45	544.60	450.52	456.99	406.03	412.18	21/08/2020
11mo ciclo	443.91	451.51	421.74	533.20	571.37	553.33	543.84	449.69	455.39	406.02	412.27	22/08/2020
			421.12	531.26	568.85	552.43	541.54	449.63	455.09	405.90	412.07	23/08/2020
13ro ciclo	444.66	452.21	421.31	533.06	570.96	554.42	542.99	449.84	455.64	406.00	412.17	25/08/2020
			421.33	532.87	571.41	555.14	543.15	449.89	455.43	406.01	412.19	26/08/2020
15to ciclo	444.45	451.77	421.32	532.66	571.25	554.55	543.19	449.83	455.32	405.99	412.17	27/08/2020
			421.19	533.06	570.79	554.31	542.32	449.74	455.23	405.94	412.11	29/08/2020
17mo ciclo	444.00	451.48	421.13	531.90	569.51	552.80	541.70	449.68	455.11	405.88	412.06	30/08/2020
			421.08	531.70	569.34	552.87	541.66	449.62	455.05	405.85	412.03	31/08/2020
19no ciclo	443.71	451.26	420.99	530.52	567.87	551.16	540.77	449.56	454.97	405.83	412.03	01/09/2020
			420.92	530.69	568.07	551.22	540.82	449.53	454.93	405.78	411.97	02/09/2020
21ro ciclo	443.61	451.25	420.89	530.51	567.79	551.01	540.59	449.47	454.88	405.74	411.92	04/09/2020
			420.95	530.12	567.15	550.50	540.52	449.43	454.84	405.75	411.94	05/09/2020
23ro ciclo	443.55	451.17	420.90	529.65	567.14	550.93	540.98	449.47	454.89	405.74	411.93	06/09/2020
			420.85	529.94	567.02	550.38	540.31	449.41	454.83	405.70	411.90	07/09/2020
25to ciclo	443.60	451.20	420.91	530.10	567.28	550.63	540.50	449.50	454.91	405.75	411.95	08/09/2020
			420.88	529.95	567.09	550.42	540.37	449.43	454.86	405.71	411.89	09/09/2020
27mo ciclo	443.58	451.21	420.87	530.01	567.04	550.38	540.32	449.46	454.87	405.75	411.92	10/09/2020
			420.87	529.75	566.82	550.25	540.27	449.45	454.87	405.75	411.92	11/09/2020
29no ciclo	443.64	451.24	420.85	529.83	566.93	550.34	540.27	449.44	454.86	405.74	411.92	12/09/2020
			420.90	530.14	567.30	550.61	540.46	449.47	454.90	405.76	411.95	13/09/2020
Maximo	451.85	461.99	420.95	530.91	568.13	551.39	540.68	449.54	454.99	405.80	411.95	14/09/2020
			420.89	529.75	566.80	550.26	540.32	449.45	454.90	405.73	411.91	15/09/2020
			425.45	538.08	580.39	563.77	549.03	452.77	461.00	409.99	413.60	
			420.85	529.65	566.80	550.25	540.27	449.41	454.83	405.70	411.89	

			N3	YQ-TW4	RQ-TW1	RQ-TW2	RQ-TW3	RQ-TW4	GQ-TW1	GQ-TW2	GQ-TW3	GQ-TW4	FECHA
			2	442.99	550.98	544.35	574.37	544.78	407.33	397.63	401.82	408.65	16/09/2020
1er ciclo	450.01	447.29	447.02	442.94	550.60	543.97	573.97	544.51	407.27	397.60	401.79	408.60	18/09/2020
			0	443.01	551.41	544.71	574.59	544.77	407.35	397.66	401.85	408.64	19/09/2020
3er ciclo	450.22	447.53	447.27	443.02	551.36	544.73	574.74	544.83	407.35	397.70	401.89	408.66	20/09/2020
			9	443.11	551.83	545.10	575.03	544.99	407.41	397.76	401.93	408.73	21/09/2020
5to ciclo	450.38	447.70	447.45	443.15	551.63	544.98	575.00	545.30	407.43	397.79	401.98	408.78	22/09/2020
			3	443.10	551.68	544.98	574.91	545.30	407.38	397.75	401.97	408.78	23/09/2020
7mo ciclo	450.30	447.59	447.36	443.16	551.34	544.66	574.57	545.08	407.34	397.76	401.97	408.77	24/09/2020
			0	443.08	551.41	544.74	574.70	545.16	407.36	397.78	401.98	408.78	25/09/2020
9no ciclo	450.27	447.57	447.36	443.16	551.34	544.68	574.62	545.23	407.41	397.84	402.05	408.86	26/09/2020
			8	443.10	551.29	544.67	574.59	545.18	407.40	397.84	402.05	408.86	27/09/2020
11mo ciclo	450.24	447.52	447.34	443.12	551.22	544.55	574.59	545.21	407.40	397.83	402.05	408.85	28/09/2020
			4	443.24	551.41	544.72	574.76	545.38	407.48	397.90	402.11	408.95	29/09/2020
13mo ciclo	450.14	447.45	447.22	443.10	550.68	544.10	574.06	545.05	407.43	397.87	402.08	408.92	01/10/2020
			2	443.11	551.28	544.62	574.62	545.25	407.42	397.90	402.10	408.94	02/10/2020
15to ciclo	450.27	447.54	447.31	443.16	551.04	544.45	574.31	545.14	407.44	397.94	402.12	408.98	03/10/2020
			0	442.20	551.48	544.72	574.65	545.38	405.51	398.00	402.19	409.04	04/10/2020
17mo ciclo	450.31	447.56	447.32	442.20	551.07	544.41	574.33	545.21	407.47	397.97	402.16	409.02	05/10/2020
			4	443.22	550.74	544.21	574.28	545.26	407.50	398.05	402.23	409.13	06/10/2020
19no ciclo	450.30	447.54	447.37	443.24	550.81	544.22	574.20	545.50	407.59	398.11	402.29	409.16	08/10/2020
			5		550.99	544.65	574.77		407.61	398.14	402.34		09/10/2020
21no ciclo	449.94	447.59	447.40		550.87	544.49	574.58		407.60	398.13	402.33		10/10/2020
			6		551.07	544.42	574.51		407.65	398.18	402.37		11/10/2020
23no ciclo	450.03	447.71	447.51		551.37	544.72	574.86		407.74	398.23	402.44		12/10/2020
			3		551.15	544.46	574.38		407.72	398.25	402.43		13/10/2020
25to ciclo	450.08	447.77	447.59		551.17	544.53	574.59		407.75	398.28	402.49		14/10/2020
			6		551.33	544.67	574.79		407.79	398.30	402.52		15/10/2020
27mo ciclo	450.10	447.78	447.60		551.12	544.33	574.49		407.80	398.33	402.54		16/10/2020
			8		551.05	544.38	574.37		407.83	398.38	402.59		17/10/2020
29no ciclo	450.15	447.80	447.64		551.23	544.49	574.46		407.90	398.43	402.65		18/10/2020
			7		551.17	544.47	574.43		407.92	398.47	402.66		19/10/2020
			9		551.11	544.55	574.60		407.82	398.36	402.56		20/10/2020
Maximo	450.38	447.93	447.77	443.24	551.83	545.10	575.03	545.50	407.92	398.47	402.66	409.16	
			2	442.20	550.60	543.97	573.97	544.51	405.51	397.60	401.79	408.60	

	so	so	so	so 3	YQ-Na ₂ SO ₄	RQ-Na ₂ SO ₄ 1	RQ-Na ₂ SO ₄ 2	RQ-Na ₂ SO ₄ 3	RQ-Na ₂ SO ₄ 4	GQ-Na ₂ SO ₄ 1	GQ-Na ₂ SO ₄ 2	GQ-Na ₂ SO ₄ 3	GQ-Na ₂ SO ₄ 4	FECHA
				0	455.50	566.45	532.69	559.70	550.40	459.85	457.61	424.01	399.02	16/09/2020
1er ciclo	485.80	492.20	487.94	4	461.99	574.42	544.27	567.06	556.28	465.77	463.01	430.31	406.73	18/09/2020
				4	467.48	589.96	558.59	582.15	566.56	478.32	473.84	435.37	412.44	19/09/2020
3er ciclo	494.06	499.36	495.33	4	469.63	593.22	558.08	586.50	565.93	485.09	482.28	437.07	416.16	20/09/2020
				4	454.87	593.26	554.63	580.21	528.72	486.07	486.12	436.59	417.57	21/09/2020
5to ciclo	450.40	457.15	453.68	5	432.97	589.92	547.30	564.92	403.74	483.24	484.89	442.37	421.13	22/09/2020
				5	398.44	586.32	542.59	547.78	299.01	482.50	479.26	435.16	421.98	23/09/2020
7mo ciclo	242.34	320.04	333.29		333.29	580.41	541.80	535.67		483.21	479.80	422.91	421.94	24/09/2020
					275.63	575.57	537.04	527.67		481.42	476.94	394.83	418.40	25/09/2020
9no ciclo						571.79	533.07	523.24		482.66	476.23	384.77	415.26	26/09/2020
						565.82	528.96	520.87		480.53	472.28	379.72	406.37	27/09/2020
11mo ciclo						558.71	524.22	517.42		478.36	462.56	380.34	407.84	28/09/2020
						553.48	519.47	515.50		485.52	473.51	389.76	409.05	29/09/2020
13ro ciclo						539.72	505.22	503.92		472.37	450.63	372.92	408.37	01/10/2020
						535.17	496.02	492.45		478.44	468.51	381.95	394.56	02/10/2020
15o ciclo						503.97	450.47	417.74		481.38	467.09	367.59	382.51	03/10/2020
						484.45	397.91	317.40		473.77	462.25	287.53	362.12	04/10/2020
17mo ciclo						479.75	363.91	204.14		453.36	423.35		239.78	05/10/2020
						472.73				445.70	401.77			06/10/2020
19no ciclo						463.32				436.70	392.01			08/10/2020
						462.24				438.27	392.75			09/10/2020
21ro ciclo						444.08				431.44	365.09			10/10/2020
						431.26				419.47	364.17			11/10/2020
23ro ciclo						427.56				427.18	374.23			12/10/2020
						425.68				424.69	375.94			13/10/2020
25o ciclo						423.95				421.13	365.09			14/10/2020
						423.52				422.56	365.84			15/10/2020
27mo ciclo						421.42				417.71	367.38			16/10/2020
						418.47				405.79	368.77			17/10/2020
29no ciclo						417.13				405.48	375.32			18/10/2020
						415.21				415.06	370.90			19/10/2020
				5	275.63	395.58	363.91	204.14	299.01	398.65	360.85	287.53	239.78	20/10/2020
Maximo	494.06	499.36	495.33	5	469.63	593.26	558.59	586.50	566.56	486.07	485.12	442.37	421.98	
				5	275.63	395.58	363.91	204.14	299.01	398.65	360.85	287.53	239.78	