

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DURABILIDAD DE
PINTURAS EN BASE A ÓXIDO DE TITANIO SINTETIZADO POR QUÍMICA VERDE
CONTRA EL ATAQUE DEL HONGO ASPERGILLUS NÍGER SOBRE
CONSTRUCCIONES EN TIERRA**

LAURA FERNANDA SANTIESTEBAN HERRERA



**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL E INGENIERO CIVIL**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA AMBIENTAL E INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2025

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DURABILIDAD DE
PINTURAS EN BASE A ÓXIDO DE TITANIO SINTETIZADO POR QUÍMICA VERDE
CONTRA EL ATAQUE DEL HONGO ASPERGILLUS NÍGER SOBRE
CONSTRUCCIONES EN TIERRA**

LAURA FERNANDA SANTIESTEBAN HERRERA

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL E INGENIERO CIVIL**

DIRECTOR

Ph.D. SANDRA NATALIA CORREA TORRES

Ph.D. CLAUDIA PATRICIA RETAMOSO LLAMAS

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA AMBIENTAL E INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2025

DEDICATORIA

A Dios y la virgencita de Guadalupe que han sido mi compañía y guía durante toda mi vida. A mi mamá, mi papá y mi familia por su apoyo incondicional. A mis sobrinos Juanjo y Alejo por ser mi más grande motivación y a todas aquellas personas que me han acompañado y han sumado un granito de arena en este camino.

Laura Fernanda Santiesteban Herrera

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Pontificia Bolivariana que me acogió durante estos años de estudio y aprendizaje con cariño, retos y muchas oportunidades para crecer integralmente con sentido humano.

A mis directoras de proyecto, las profesoras Sandra Correa y Claudia Retamoso por formarme con excelencia, comprensión y empatía, brindándome herramientas valiosas de investigación y experiencias que han sumado a mi desarrollo personal y profesional, de igual forma por la dedicación de su tiempo y apoyo incondicional. A los profesores y equipo de técnicos de laboratorios que me acompañaron en todo mi proceso de formación y desarrollo del proyecto brindándome su colaboración práctica, en especial a la investigadora Claudia Santoyo Muñoz, al grupo técnico del Laboratorio de Estudios Ambientales y Laboratorio de Materiales de Construcción de la facultad de ingeniería ambiental y civil respectivamente.

A mis padres y familiares por su amor y apoyo incondicional durante este camino. A Dios y la virgencita de Guadalupe por acompañarme, darme salud y guiar cada paso.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
A. Antecedentes	18
II. JUSTIFICACIÓN	20
III. OBJETIVOS	21
A. Objetivo general	21
B. Objetivos específicos	21
IV. MARCO TEÓRICO	22
A. La tierra para construcción.....	22
B. Revestimientos en tierra.....	27
C. Procesos de deterioro de la arquitectura en tierra	37
D. Nanotecnología en la conservación del Patrimonio Cultural en tierra.....	41
V. METODOLOGÍA.....	47
A. Etapa 1: Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los componentes de la pintura natural con nano TiO ₂	47
1) Fase 1: Caracterización propiedades fisicoquímicas del pigmento mineral:	48
2) Fase 2: Síntesis por química verde y caracterización de nanopartículas de TiO ₂ en microscopio electrónico de barrido (SEM):.....	49
3) Fase 3: Formulación de pinturas naturales variando el tipo de aglomerante:	50
4) Fase 4: Control de la calidad de las pinturas naturales P1 y P2 según requisitos NTC 1335: 52	
B. Etapa 2: Evaluación antifúngica de la pintura natural con nano TiO ₂ contra el ataque del hongo A. Níger:	52
1) Fase 5: Dispersión de nano TiO ₂ en pintura natural P2 por el método de cavitación ultrasónica:.....	53
2) Fase 6: Crecimiento, aislamiento y suspensión de esporas fúngicas:	54
3) Fase 7: Evaluación antifúngica de la pintura natural P2 con nano TiO ₂ , método de ensayo ASTM D5590-17:	55
C. Etapa 3: Determinación de la resistencia mecánica y durabilidad de la pintura natural con nano TiO ₂ aplicada en BTC.....	56

1) Fase 8: Caracterización de propiedades fisicoquímicas y mecánicas del suelo para fabricación de Bloques de Tierra comprimida:.....	57
2) Fase 9: Evaluación de la resistencia mecánica de la pintura natural con nano TiO ₂ sobre BTC:.....	59
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
A. Etapa 1: Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los componentes de la pintura natural con nano TiO ₂	61
B. Etapa 2: Evaluación antifúngica de la pintura con nano TiO ₂ contra el ataque del hongo Aspergillus Níger.....	82
C. Etapa 3: Determinación de la resistencia mecánica y durabilidad de la pintura con nano TiO ₂ aplicada sobre BTC.....	90
VII. CONCLUSIONES	104
VIII. RECOMENDACIONES	106
IX. REFERENCIAS.....	107

LISTA DE TABLAS

TABLA I PROPIEDADES DE LA TIERRA PARA CONSTRUCCIÓN	24
TABLA II PROPIEDADES FÍSICAS DE REVESTIMIENTOS DE TIERRA.....	29
TABLA III TRATAMIENTOS DIRECTOS PARA EL CONTROL DEL BIODETERIORO EN FACHADAS	40
TABLA IV EMPRESAS DEDICADAS A LA VENTA DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS PARA LA PRESERVACIÓN DE SUPERFICIES	45
TABLA V ENSAYOS FISICOQUÍMICOS REALIZADOS PARA EL PIGMENTO MINERAL	48
TABLA VI COMPOSICIÓN PINTURA NATURAL	51
TABLA VII ENSAYOS CONTROL DE CALIDAD DE PINTURAS NATURALES EN BASE AGUA	52
TABLA VIII PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN DEL SUELO PARA BTC	57
TABLA IX RESULTADOS ENSAYO TAMAÑO DE PARTÍCULAS DEL PIGMENTO MINERAL, MÉTODO TAMIZADO	61
TABLA X RESULTADOS ENSAYO TEXTURA DEL PIGMENTO MINERAL, MÉTODO DE BOUYOUCOS	63
TABLA XI CONTENIDO DE PARTÍCULAS DE ARENA, LIMO Y ARCILLA EN EL PIGMENTO MINERAL	64
TABLA XII RESULTADOS ENSAYO HUMEDAD GRAVIMÉTRICA DEL PIGMENTO MINERAL.....	65
TABLA XIII RESULTADOS ENSAYO LÍMITE LIQUIDO DEL PIGMENTO MINERAL.....	65
TABLA XIV RESULTADOS LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DEL PIGMENTO MINERAL	66
TABLA XV GRADO DE PLASTICIDAD DEL PIGMENTO MINERAL A PARTIR DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD.....	67
TABLA XVI RESULTADOS LÍMITE DE CONTRACCIÓN DEL PIGMENTO MINERAL ...	68
TABLA XVII RESULTADOS ENSAYO DENSIDAD REAL DEL PIGMENTO MINERAL ..	69
TABLA XVIII RESULTADOS ENSAYO PH DEL PIGMENTO MINERAL, MÉTODO POTENCIÓMETRO	70

TABLA XIX RESULTADOS ENSAYO CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL PIGMENTO MINERAL, MÉTODO CONDUCTÍMETRO	71
TABLA XX RESULTADOS ESTADÍSTICOS DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE NANOPARTÍCULAS DE TIO ₂	71
TABLA XXI RESULTADOS COMPOSICIÓN QUÍMICA DE NANOPARTÍCULAS DE TIO ₂	73
TABLA XXII RESULTADOS PH Y CONDUCTIVIDAD DE LA PINTURA NATURAL P1 Y P2.....	74
TABLA XXIII RESULTADOS DENSIDAD PINTURAS NATURALES P1 Y P2.....	75
TABLA XXIV RESULTADOS VISCOSIDAD DE PINTURAS NATURALES P1 Y P2	76
TABLA XXV RESULTADOS CONTENIDO DE MATERIAL NO VOLÁTIL PARA PINTURAS NATURALES P1 Y P2	77
TABLA XXVI RESULTADOS TIEMPO DE SECADO, CURADO Y FORMACIÓN DE PELÍCULA DE PINTURAS NATURALES P1 Y P2.....	78
TABLA XXVII COMPOSICIÓN QUÍMICA PINTURA P2 CON NANOPARTÍCULAS DE TIO ₂ , VARIANDO LA CONCENTRACIÓN DEL NANOMATERIAL	85
TABLA XXVIII RESULTADOS PORCENTAJE DE COBERTURA EN DISCOS DE PRUEBA CON PINTURA P2 + NANO TIO ₂ EXPUESTAS AL HONGO A. NÍGER	89
TABLA XXIX RESULTADOS ENSAYO LÍMITE LIQUIDO SUELO PARA BTC.....	91
TABLA XXX RESULTADOS ENSAYO LÍMITE DE PLASTICIDAD SUELO PARA BTC ..	91
TABLA XXXI RESULTADOS ENSAYO PROCTOR ESTÁNDAR EN SUELO PARA BTC.	93
TABLA XXXII RESULTADOS ENSAYO TEXTURA DEL SUELO PARA BTC, MÉTODO IN – SITU	96
TABLA XXXIII RESULTADOS ENSAYO DE COMPRESIÓN EN CUBOS, SUELO PARA BTC	100
TABLA XXXIV RESULTADOS ENSAYO DE COMPRESIÓN EN CILINDROS, SUELO PARA BTC	101
TABLA XXXV RESULTADOS ENSAYO EROSIÓN HÚMEDA POR CAÍDA DE AGUA EN BTC CON RECUBRIMIENTO FOTOCATALÍTICO	101
TABLA XXXVI NIVEL DE RESISTENCIA EROSIÓN HÚMEDA SOBRE BTC CON RECUBRIMIENTO FOTOCATALÍTICO.....	102

TABLA XXXVII RESULTADOS ENSAYO ABRASIÓN EN BTC CON RECUBRIMIENTO FOTOCATALÍTICO	103
--	-----

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 Uso de la construcción en tierra en el mundo [32].	22
Fig. 2 Procesos de formación de suelos [31].	22
Fig. 3 Horizontes del suelo [31].	22
Fig. 4 Microestructura laminar de partículas de arcilla [36].	23
Fig. 5 Técnicas de construcción en tierra [33].	26
Fig. 6 Técnicas de construcción en tierra en Colombia [3].	26
Fig. 7 Tipos de BTC [41].	27
Fig. 8 Proceso de desaglomeración de partículas de pigmento [47].	31
Fig. 9 Formas y estados de las partículas de pigmento [45].	31
Fig. 10 Forma microscópica de arcillas coloidales [44].	32
Fig. 11 Disposición y forma de los agregados que se generan entre las partículas finas de los pigmentos minerales de pinturas [45].	33
Fig. 12 Estructura química de la amilasa (arriba) y amilopectina (abajo) [48].	34
Fig. 13 Cambios de los gránulos de almidón durante procesos hidrotérmicos [48].	35
Fig. 14 Partes del nopal (<i>Opuntia</i> spp.) [51].	36
Fig. 15 Estructura química del acetato de polivinilo (PVAc) [53].	36
Fig. 16 Agentes deteriorantes de las fachadas de edificaciones [30].	37
Fig. 17 Tipo de organismos colonizadores biodeteriorantes de fachadas [21].	39
Fig. 18 Tipo de organismos colonizadores biodeteriorantes de fachadas [58].	41
Fig. 19 Proceso de fotocatalisis en dióxido de titanio (material semiconductor) [30].	42
Fig. 20 métodos y procesos de síntesis de nanopartículas [64].	43
Fig. 21 Fases del proceso de síntesis de nanopartículas metálicas por química verde [67].	44
Fig. 22 Mecanismos de inactivación fúngica sugeridos, producidos por el proceso de fotocatalisis de nanopartículas [68].	46
Fig. 23 Metodología del proyecto	47
Fig. 24 Metodología caracterización propiedades fisicoquímicas del pigmento mineral	48
Fig. 25 Metodología síntesis por química verde y caracterización de nanopartículas	50
Fig. 26 Metodología formulación de pinturas naturales en base a pigmento mineral	51
Fig. 27 Metodología formulación de pinturas naturales en base a pigmento mineral	53
Fig. 28 Metodología crecimiento, aislamiento y suspensión de esporas fúngicas	54

Fig. 29 Metodología evaluación antifúngica pintura natural con nano TiO ₂	55
Fig. 30 Metodología caracterización suelo para BTC.....	58
Fig. 31 Metodología fabricación de BTC y aplicación de pintura natural con nano TiO ₂	59
Fig. 32 Metodología fabricación de BTC y aplicación de pintura natural con nano TiO ₂	60
Fig. 33 Curva distribución de tamaños del pigmento mineral	62
Fig. 34 Triangulo textural suelo pigmento mineral.....	64
Fig. 35 Curva Límite liquido del pigmento mineral.....	66
Fig. 36 Carta de plasticidad de Casagrande para pigmento mineral	67
Fig. 37 Curva Límite de contracción del pigmento mineral	69
Fig. 38 Disponibilidad de minerales en el suelo según valores de pH.....	70
Fig. 39 Micrografías del nanomaterial a 100 kx, 250 kx y 500 kx aumentos con su distribución de tamaños en el punto 1	72
Fig. 40 Micrografías del nanomaterial a 100 kx, 250 kx y 500 kx aumentos con su distribución de tamaños en el punto 2.....	72
Fig. 41 Micrografías del nanomaterial a 50 kx y 100 kx ensayo EDS.....	73
Fig. 42 Viscosidad de las pinturas naturales P1 y P2 antes y después de ajusta de pH	76
Fig. 43 Contenido material no volátil de las pinturas naturales P1 y P2.....	77
Fig. 44 Resultado ensayo contenido material no volátil de las pinturas naturales P1 y P2.	78
Fig. 45 Tiempo de secado, curado y formación de película seca pinturas naturales P1 y P2.	79
Fig. 46 Resultado ensayo tiempo de secado, curado y formación de película seca pinturas naturales P1 y P2.	79
Fig. 47 Patrón de referencia ensayo cuarteamiento aplicando un alto espesor.	80
Fig. 48 Resultado ensayo cuarteamiento aplicando un alto espesor pinturas naturales P1 y P2. ..	80
Fig. 49 Patrón de referencia fotográfico No 1 ensayo grado de entizamiento.	81
Fig. 50 Resultados ensayo grado de entizamiento, método A, pinturas naturales P1 y P2.....	81
Fig. 51 Resultados ensayo grado de entizamiento, método B, pinturas naturales P1 y P2.....	82
Fig. 52 Micrografías SEM a 1 kx, 10 kx, 50 kx y 100 kx de pintura P2 sin nanopartículas a pH 12, 10 y 8 respectivamente.....	83
Fig. 53 Micrografías SEM a 1 kx, 10 kx, 50 kx y 100 kx de pintura P2 sin nanopartículas a pH 12, 10 y 8 respectivamente.....	84
Fig. 54 Composición química pintura P2 sin nanopartículas pH = 8.....	85

Fig. 55 Crecimiento y aislamiento del hongo <i>Aspergillus Níger</i> en medio de cultivo PDA.	87
Fig. 56 Micrografías hongo <i>Aspergillus Níger</i> en microscopio óptico 4x, 10 x y 40 x aumentos.	88
Fig. 57 Micrografías hongo <i>Rhizopus Stolonifer</i> en microscopio óptico 4x, 10 x y 40 x aumentos.	88
Fig. 58 Porcentajes de cobertura de esporas fúngicas sobre discos de prueba con pintura natural P2 + nano TiO ₂	90
Fig. 59 Curva granulométrica suelo para BTC.	90
Fig. 60 Limite liquido suelo para BTC.	91
Fig. 61 Carta de plasticidad Casagrande del suelo para BTC.	92
Fig. 62 Curva compactación suelo para BTC, ensayo Proctor estándar.	93
Fig. 63 Tamaño y color de partículas de suelo para BTC.	94
Fig. 64 Ensayo de corte o brillo en suelo para BTC.	95
Fig. 65 muestra de suelo para BTC.	95
Fig. 66 Test caída de bola, suelo para BTC.	96
Fig. 67 Diagrama textural para clasificación del suelo para BTC.	97
Fig. 68 Diagrama textural para uso del suelo en construcción con tierra.	97
Fig. 69 Ensayo consistencia del suelo para BTC.	98
Fig. 70 Ensayo cohesión del suelo para BTC.	98
Fig. 71 Ensayo exudación del suelo para BTC.	98
Fig. 72 Ensayo resistencia seca del suelo para BTC.	99
Fig. 73 Test del rollo, suelo para BTC.	99
Fig. 74 Ensayo resistencia a la erosión húmeda en BTC de prueba sin pintura, con pintura, con pintura con nanopartículas.	102
Fig. 75 Ensayo resistencia a la abrasión en BTC de prueba sin pintura, con pintura, con pintura con nanopartículas.	103

ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
BTC	Bloque de Tierra Comprimida
CINVA – RAM	Prensa manual para elaboración de Bloques de Tierra Comprimida
CRATerre	Centro Internacional para la Construcción en Tierra
CO₂	Dióxido de carbono
COV_s	Compuestos orgánicos volátiles
EDS	Espectroscopia de difracción de rayos X
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
HR	Humedad Relativa
KN	Kilo Newton
MPa	Mega Pascales
NO_x	Óxidos de nitrógeno
NP	Nanopartículas
NTC	Norma Técnica Colombiana
OH[·]	Radical hidroxilo
O₂^{·-}	Radical super oxido
P1	Pintura natural con aglomerante sintético
P2	Pintura natural con aglomerante natural
PM	Material Particulado
PVAc	Acetato de polivinilo
nm	Nanómetro
RED PROTERRA	Red Iberoamericana de Arquitectura y Construcción con Tierra
RED PROTIERRA	Red Argentina para el desarrollo de la Construcción con Tierra
ROS	Especies reactivas de oxígeno
SEM	Microscopio electrónico de barrido
SOX	Óxidos de azufre
TiO₂	Dióxido de titanio
UV	Ultravioleta



RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO EN ESPAÑOL

TITULO:

Evaluación del comportamiento mecánico y durabilidad de pinturas en base a óxido de titanio sintetizado por química verde contra el ataque del hongo *Aspergillus Níger* sobre construcciones en tierra

AUTOR(ES):

Laura Fernanda Santiesteban Herrera

PROGRAMA:

Ingeniería Ambiental e Ingeniería Civil

DIRECTOR(A):

Sandra Natalia Correa Torres y Claudia Patricia Retamoso Llamas

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se evaluó el efecto de las nanopartículas de dióxido de titanio sintetizadas a partir de un método de química verde de coprecipitación, usando agentes bioreductores de hojas de *Mentha Arvensis* y *Aloe barbadensis mil* en combinación con el agente precursor isopropóxido de titanio (IV), en el comportamiento mecánico y durabilidad de pinturas con pigmentos minerales de suelo arcilloso (CL) para la protección de construcciones en tierra ante procesos de biodeterioro generados por el hongo *Aspergillus Níger*. La aplicación del nanomaterial se realizó a través del método combinado de ajuste de pH de las pinturas y cavitación ultrasónica durante 10, 20 y 30 minutos de dispersión en agua destilada a concentraciones de 0.1%, 0.3% y 0.5% v. A partir del análisis fisicoquímico de los componentes de las pinturas naturales (pigmento mineral y nanopartículas de TiO_2), la evaluación de la calidad de las pinturas formuladas con acetato de polivinilo (P1) y almidón de yuca (P2) según los requisitos de la norma NTC 1335, la evaluación del efecto antifúngico en medios de cultivo PDA a partir del método de ensayo ASTM D5590-17 y la determinación de la resistencia a la erosión húmeda y abrasión de las pinturas aplicadas con brocha sobre Bloques de Tierra Comprimida, se obtuvo como resultado una pintura natural con capacidad de inhibición fúngica del 90% y resistencia mejorada a la erosión húmeda de impacto directo al agregar 0.5% de nanopartículas de dióxido de titanio en fase anatasa, de forma esférica y tamaño promedio entre 9 a 32 nm, dispersas durante 20 minutos; sin embargo, es necesario seguir investigando las modificaciones en las superficie del nanomaterial agregado a pinturas naturales para garantizar un efecto de limpieza fotocatalítico más duradero para dar respuesta a las necesidades de la industria de la conservación del Patrimonio Cultural.

PALABRAS CLAVE:

Pintura; Nanopartículas de dióxido de titanio, Bloque de Tierra Comprimida; *Aspergillus Níger*; Cavitación ultrasónica

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

Sandra M. Correa Torres Claudia Patricia Retamoso Llamas



GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Evaluation of the mechanical behavior and durability of titanium oxide-based paints synthesized by green chemistry against the attack of the fungus *Aspergillus Niger* on earth constructions

AUTHOR(S): Laura Fernanda Santiesteban Herrera

FACULTY: Enviromental Engineering and Civil Engineering

DIRECTOR: Sandra Natalia Correa Torres and Claudia Patricia Retamoso Llamas

ABSTRACT

In this research work, the effect of titanium dioxide nanoparticles synthesized from a coprecipitation green chemistry method was evaluated, using bioreducing agents from *Mentha Arvensis* and *Aloe barbadensis* leaves in combination with the precursor agent titanium (IV) isopropoxide, on the mechanical behavior and durability of paints with clayey soil mineral pigments (CL) for the protection of earth constructions against biodeterioration processes generated by the fungus *Aspergillus Niger*. The application of the nanomaterial was carried out through the combined method of pH adjustment of the paints and ultrasonic cavitation for 10, 20 and 30 minutes of dispersion in distilled water at concentrations of 0.1%, 0.3% and 0.5%v. From the physicochemical analysis of the components of natural paints (mineral pigment and TiO₂ nanoparticles), the quality evaluation of paints formulated with polyvinyl acetate (P1) and cassava starch (P2) according to the requirements of NTC 1335, the evaluation of the antifungal effect in PDA culture media from the ASTM D5590-17 test method and the determination of the resistance to wet erosion and abrasion of paints applied by brush on Compressed Earth Blocks, the result was a natural paint with a fungal inhibition capacity of 90% and improved resistance to wet erosion from direct impact by adding 0.5% of titanium dioxide nanoparticles in anatase phase, spherical in shape and average size between 9 to 32 nm, dispersed for 20 minutes; However, further research is needed into surface modifications of nanomaterials added to natural paints to ensure a longer-lasting photocatalytic cleaning effect and meet the needs of the Cultural Heritage conservation industry.

KEYWORDS: Paint; Titanium dioxide nanoparticles, Compressed earth block; *Aspergillus niger*; Ultrasonic cavitation

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Sandra M. Correa Torres *Claudia Patricia Retamoso Llamas*

INTRODUCCIÓN

La tierra para construcción es uno de los materiales más antiguos usados por el hombre a través de la historia de la humanidad. Su abundancia y fácil manipulación ha permitido un uso continuo y extensivo en casi todas las partes del mundo [1], [2]. En Colombia, la arquitectura en tierra tiene una gran importancia en la identidad cultural de la sociedad ya que el 80% de los 1133 monumentos y 47 centros históricos del país han sido construidos en tierra [3], [4].

Con el paso del tiempo, la durabilidad de las estructuras en tierra del Patrimonio Cultural ha disminuido por la acción combinada de factores naturales y factores antropogénicos como la acción del agua y contaminantes atmosféricos primarios que propician un acelerado deterioro fisicoquímico, mecánico y biológico en las superficies expuestas [5]; la acción del agua, a través de cambios extremos en la humedad relativa y temperaturas, suele causar aumento en la alcalinidad y dureza de la superficie por arrastre de minerales que a su vez interfieren en la evaporación de agua de la estructura interna; por otra parte, la presencia de contaminantes atmosféricos (CO_2 , NO_x , SO_x , PM, COV_s) favorecen la formación de costras negras, acidificación del sustrato, eflorescencia y cambios de coloración superficial [6], [7].

Estos agentes deteriorantes también actúan como factores aceleradores del crecimiento de microorganismos y formación de colonias en las fachadas de las superficies del Patrimonio Cultural; el desarrollo de biopelículas o patinas conlleva a una pérdida de cohesión de los material y posterior desprendimiento de recubrimientos protectores y estéticos [8]. En regiones tropicales, las biopelículas de microorganismos están conformadas en su mayoría por especies fúngicas como el hongo *Aspergillus Níger*, *Penicillium*, *Cladosporium*, *Alternaria*, *Fusarium* y *Trichoderma*, que además de causar deterioro de los materiales pétreos, son un amenaza latente para la salud humana por el desarrollo de enfermedades respiratorias como alergias, asma y aspergilosis [9], [10], [11], [12], [13], [14].

Debido a la necesidad de reducir la acelerada colonización de microorganismos fúngicos en las superficies del Patrimonio Cultural, se han desarrollado diversos materiales de recubrimiento con nanotecnología que permiten la conservación del sustrato al inhibir el biodeterioro y aumentar la durabilidad de los materiales pétreos a contaminantes atmosféricos y cambios climáticos extremos. El uso de nanomateriales, como nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2), en recubrimientos tipo pinturas, proporciona una eficiente capacidad de autolimpieza a las superficies deterioradas o en proceso de deterioro a través de la inhibición del crecimiento de

microorganismos, disminución o aumento del ángulo de contacto de gotas de agua y foto oxidación de contaminantes atmosféricos adheridos debido a la actividad fotocatalítica que exhibe el material semiconductor en tamaño nanométrico en presencia directa de fotones de luz UV natural o artificial [10], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23]. La generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) a través de reacciones de oxido – reducción (redox) producidas en la banda de valencia y banda de conducción respectivamente del material semiconductor TiO_2 , sintetizado por un método de química verde previamente optimizado con agentes bioreductores de hojas de menta y cristal de aloe vera [24] y disperso en pinturas naturales por medio de un proceso de cavitación ultrasónica, permitió, en el presente trabajo de grado experimental, inhibir el crecimiento de especies fúngicas como el hongo *Aspergillus Níger* y mejorar la resistencia a la erosión húmeda sobre elementos constructivos en tierra.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La degradación del Patrimonio Cultural construido en tierra depende de diversos agentes causantes de deterioro fisicoquímico, biológico, y mecánico. A través de los años, los procesos de deterioro se han intensificado por factores antrópicos que aumentan la concentración de contaminantes atmosféricos y generan una mala calidad del aire; debido a la severidad de los contaminantes atmosféricos primarios (CO₂, NO_x, SO_x, PM, COV_s) y sus reacciones secundarias con otros compuestos en condiciones ambientales catalizadoras (radiación UV, O₃, entre otros), la necesidad de conservar el Patrimonio Cultural es cada vez más urgente. Diversos artículos presentan una variada lista de fenómenos de descomposición que ocurren en los materiales pétreos que conforman el Patrimonio Cultural como por ejemplo la recesión de la superficie y acumulación de biomasa, deposiciones de compuestos que acidifican el sustrato y al mismo tiempo son nutrientes indispensables para procesos de colonización microbiológica. y meteorización de superficies [25].

A. Antecedentes

En 2015 se describieron las comunidades fúngicas que se desarrollaron en las superficies de diversas construcciones patrimoniales en tierra de la cuenca del río Paraíba do Sul en São Paulo debido a la acumulación de humedad y materia orgánica en los elementos constructivos a través de los años [26], como resultado se encontró que las fachadas de muros con mayor presencia de biodeterioro eran aquellas que presentaban mayor porcentaje de microorganismos fúngicos como la especie *Aspergillus Níger*, con composición granulométrica gruesa que aumentaba la porosidad del sustrato, con material orgánico (paja) con el que se había estabilizado la mezcla de suelo de la estructura y nivel de exposición debido a su orientación.

En 2019, la investigación [27] permitió identificar las especies fúngicas que conformaban las distintas biopelículas causantes de deterioro en las edificaciones tradicionales de la Universidad de Santander (UNDES), las cuales se desarrollaron gracias a condiciones ambientales y geográficas idóneas; como resultado los autores observaron que las especies fúngicas más presentes en las colonias de las fachadas se encontraban el *Aspergillus Níger*, *Aspergillus Fumigatus*, *Penicillium* y *Fusarium*. A partir de este resultado se demostró que los tratamientos de conservación deben tener una alta capacidad de inhibición fúngica para proporcionar una alta resistencia y durabilidad al desarrollo de organismos causantes de enfermedades respiratorias.

En 2020, a partir de la investigación [13] se evaluaron la correlación entre los agentes causante de deterioro biológico y la composición del Patrimonio Cultural edificado deteriorado por la acción del cambio climático en la ciudad de Barranquilla, como resultado obtuvieron que los morteros de tipo calcáreos y el uso de diferentes tipos de cemento en intervenciones de conservación juegan un papel protagónico en la colonización de cianobacterias y hongos como las especies *Oscillatoria sp.* y *Aspergillus Níger* respectivamente.

En 2021, en la investigación [6] se evaluó la implicación de la contaminación en la depreciación de la Muralla de Cartagena de Indias a través de la identificación de contaminantes atmosféricos precipitados y acumulados en el sustrato debido a las condiciones ambientales de niebla salina, lluvia acida y clima tropical húmedo de la zona, se evidencio que la presencia partículas ultrafinas y nanopartículas contaminantes contribuyeron a la aparición de costras negras que desprenden el material pétreo.

En la investigación de 2023 [8], los autores realizaron una revisión para analizar las características de las costas negras y su relación con el medio ambiente y los materiales pétreos enfatizándose en los procesos de la interfaz de superficies arquitectónicas de entornos urbanos altamente contaminados. Como resultado se observó que el fenómeno de ennegrecimiento de las superficies adopta dos principales formas, la primera es la suciedad e implica la acumulación de polvo en la superficie, se caracteriza por su color negro y alto contenido de carbono, y el segundo es la alteración química de la superficie lo que resulta en la formación de costras negras.

En 2024, la investigación [28] permitió el desarrollo de ecuaciones de daño del Patrimonio Cultural asociadas a la presencia de contaminantes atmosféricos y su interacción con elementos catalizadores como el ozono; como resultado se determinó que el aumento en la formación de contaminantes secundarios era el principal factor para el desarrollo de costras negras, corrosión y biopelículas en las superficies expuestas.

En 2025, los autores de la investigación [29] encontraron que los efectos combinados de la humedad, las fluctuaciones de temperatura y la contaminación atmosférica son los principales agentes promotores y aceleradores de la actividad biológica en la superficie mediante la cual se afecta la integridad estructural y valor estético de las construcciones del Patrimonio Cultural.

II. JUSTIFICACIÓN

Preservar el Patrimonio Cultural construido en tierra de procesos de deterioro representa una prioridad social y económica. En primer lugar por ser una muestra de la historia de la humanidad que nutre la identidad cultural, según cifras de la UNESCO el 15% de las construcciones en tierra del mundo hacen parte del Patrimonio Cultural [2]; y en segundo lugar por ser un sistema constructivo que ha permitido el desarrollo de vivienda sostenible para más del 34% de la población global, en países en desarrollo esta cifra logra alcanzar hasta el 50% de la población, ya que consume menor energía y agua en su proceso constructivo y sus residuos son reciclables en comparación con otros residuos de construcción industrializada [3].

Considerando la nanotecnología como un pilar en el avance de tratamientos para la conservación del patrimonio cultural [30], en este proyecto se promueve el desarrollo y mejora de prácticas constructivas tradicionales con la adición de nanopartículas de TiO_2 , sintetizadas a través de una sencilla y practica metodología de química verde que permite el aprovechamiento de biomoléculas de menta y aloe vera, para disminuir los procesos de deterioro fisicoquímico, mecánico y biológico a los que están expuestos las superficies del patrimonio cultural. Con el uso de este nanomaterial incorporado en un revestimiento estético (pintura) se busca otorgar a la superficie una capacidad de autolimpieza eficiente, resistencia al deterioro por efecto de la abrasión y erosión húmeda, reducción en los costos de mantenimiento y consumo de materiales con impactos negativos en el ambiente. Es importante fomentar la investigación y el desarrollo de materiales de construcción sostenible como respuesta a las necesidades actuales de la industria.

III. OBJETIVOS

A. *Objetivo general*

Evaluar el efecto que tienen las nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2), sintetizadas por química verde, sobre el comportamiento mecánico y durabilidad de pinturas naturales para la protección de construcciones en tierra ante el ataque del hongo *Aspergillus Níger*.

B. *Objetivos específicos*

- Analizar las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los materiales que conforman las pinturas naturales con nanopartículas de TiO_2 , sintetizadas a partir de química verde, para controlar la calidad y durabilidad de las pinturas.
- Evaluar la actividad antifúngica de la pintura natural con nanopartículas de TiO_2 contra el hongo *Aspergillus Níger* para la protección de elementos constructivos en tierra ante procesos de biodeterioro.
- Determinar la resistencia mecánica de los materiales con nanopartículas de TiO_2 aplicados sobre Bloques de Tierra Comprimida (BTC) para garantizar el comportamiento físico de la pintura natural ante condiciones de desgaste.

IV. MARCO TEÓRICO

A. La tierra para construcción

La tierra ha sido material de construcción más utilizado alrededor del mundo, como se observa en la Fig. 1. Proviene de diferentes procesos naturales fisicoquímicos y mecánicos entre los cuales se incluye el intemperismo de la roca madre, la radiación solar, el viento, la precipitación y la proliferación de organismos [31] como se muestra en la Fig. 2.



Fig. 1 Uso de la construcción en tierra en el mundo [32].



Fig. 2 Procesos de formación de suelos [31].

La desintegración de la roca madre a través del tiempo genera la formación de capas u horizontes que conforman la unidad del suelo, la tierra útil para construcción es aquella porción de suelo que se encuentra en la capa denominada A2 o B, entre los 50 cm a 2 m de profundidad como se muestra en la Fig. 3. [31]

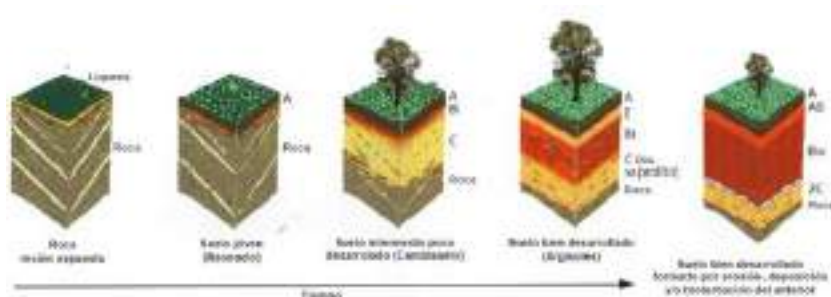


Fig. 3 Horizontes del suelo [31].

La característica principal de este horizonte es la poca o casi nula presencia de materia orgánica y microorganismos que se nutren de ella, con lo cual se garantiza inicialmente el comportamiento físico, estabilidad, resistencia y durabilidad de las estructuras en tierra [33]. Las partículas minerales que lo conforman se clasifican en inertes y activas, las primeras hacen referencia a aquellas que tienen tamaños de 200 a 0,002 mm de diámetro (piedra, grava y arena) y las segundas hacen referencias a aquellas que tienen tamaños inferiores a 0,002 mm de diámetro (limo y arcilla) y desempeñan un rol de material aglomerante [34].

Los compuestos de estas partículas minerales inorgánicas tienen una estructura interna determinada por un cierto arreglo específico de sus átomos que condiciona las propiedades fisicoquímicas de los suelos como su color, textura, dureza, resistencia, capacidad de intercambio catiónico, conductividad, densidad, porosidad, entre otras; los suelos formados por partículas gruesas presentan de manera predominante minerales de silicato, óxidos y carbonatos y los suelos formados por partículas finas presentan principalmente coloides de arcillas formadas de rocas ígneas y metamórficas [35]. Los coloides de arcillas con formas laminares proporcionan fuerza capilar entre las superficies planas al entrar en contacto con moléculas de agua, adquiriendo propiedades significativas de cohesión y plasticidad [31], [34]; en la Fig. 4 se presenta un ejemplo de la microestructura laminar de las arcillas, cada lamina presenta una estructura molecular basada en el apilamiento de capas conformadas por cristales agregados de tetraedros de silicio y oxígeno [36].

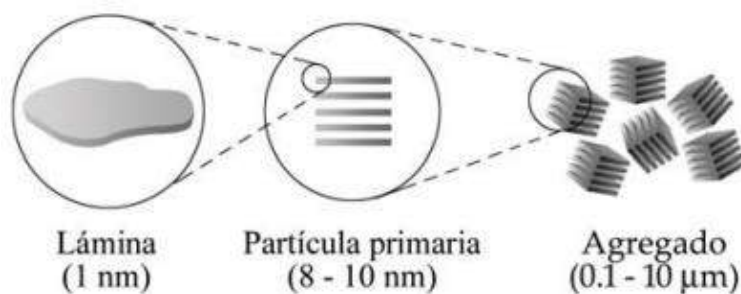


Fig. 4 Microestructura laminar de partículas de arcilla [36].

Para llevar a cabo un adecuado proceso constructivo, es necesario conocer propiedades intrínsecas de las partículas de suelo, tales como las que se presentan en la Tabla 1.

TABLA I
PROPIEDADES DE LA TIERRA PARA CONSTRUCCIÓN

Propiedad	Descripción
Textura	Se define como la composición granular de la tierra. Permite regular otras características del suelo como la resistencia, durabilidad y transporte de agua [37].
Cohesión	Permite la asociación de las partículas de tierra mediante cambios volumétricos de las arcillas coloidales, en un inicio el suelo absorbe de un 20 a 30% volumen de agua para generar expansión de las partículas y posteriormente disminuye su volumen por evaporación del agua y contracción de partículas aglomeradas [37].
Plasticidad	Se define como la capacidad que tiene la tierra en moldearse sin presentar agrietamiento o rompimiento hasta un punto de humedad determinado [35].
Compresibilidad	Se define como la capacidad que tiene la tierra, en estado húmedo, para reducir su porosidad por medio de la aplicación de energía mecánica de aplastamiento del material que hace que las moléculas de agua fluyan como lubricante entre las partículas y permita su acomodamiento entre los espacios libres para que ocupen un menor volumen. La masa volumétrica máxima para un suelo arcilloso es de 2000 Kg/m ³ [32], [37].
Durabilidad	Se define como la capacidad del suelo para soportar, durante un periodo de tiempo en servicio para el que ha sido proyectado, las condiciones fisicoquímicas a las cuales estará expuesto. Existen tres tipos de durabilidad, la primera es aquella ante procesos de deterioro causado por procesos físicos como agua lluvia y abrasión, la segunda se da ante procesos de deterioro químico y la tercera se da por procesos de deterioro de los minerales por acción biológica. La principal causa de disminución de la durabilidad de las construcciones en tierra es la humedad ya que provoca cambios volumétricos, movimiento y dilución de minerales por escorrentía capilar [38].
Porosidad	Se define como la relación entre el volumen de todos los poros de suelo. El volumen del suelo no ocupado por partículas sólidas está compuesto por macro y microporos que retienen agua, nutrientes, aire y gases atmosféricos [37], [39].

Propiedad	Descripción
Superficie específica	Se define como la suma de las superficies de todas las partículas, en el caso de las arcillas entre mayor sea su superficie específica mayor será la fuerza interna de adhesión. Esta propiedad influye en la capacidad aglutinante y resistencia a fuerzas de compresión y tensión del suelo durante procesos constructivos [31].
Densidad	Se define como la relación entre la masa de las partículas con respecto al volumen que ocupan. En estado libre la tierra presenta un valor de densidad de 1200 a 1500 kg/m ³ y en estado moldeado o compactado el valor de densidad varía entre 1700 a 2200 kg/m ³ dependiendo de la composición del material granular [37].
Humedad	Se define como disolvente universal y agente activador de la cohesión durante todo el ciclo de vida de la tierra, permite activar las fuerzas aglutinantes de las partículas activas coloidales por la relación químico eléctrica de sus átomos. Se presenta en forma cristalizada, absorbida o capilar [31].
Contenido de aire	Se define como el contenido de vacíos del suelo que no contiene material orgánico o moléculas de agua retenidas, permite determinar qué tan resistente es el material, un valor de 0% indica que el material tiene un alto grado de compacidad y un valor de 100% indica que el material tiene una alta capacidad de deformación y desplazamiento de partículas [35].

Los métodos constructivos, que usan como material de construcción principal la tierra, más usados alrededor del mundo son el adobe, la tapia pisada, el bahareque, los bloques de tierra comprimida y las técnicas mixtas. En primer lugar el adobe hace referencia a elementos constructivos de mampostería que se elaboran a partir de la colocación manual de barro o lechada, compuesta de tierra y agua en proporciones ideales, en un molde posicionado en una superficie plana y lisa para desmoldar de manera inmediata; en segundo lugar la tapia pisada corresponde a la fabricación de muros monolíticos elaborados in – situ mediante la compresión de capas de tierra en estado húmedo dentro de grandes moldes, generalmente de madera, conocidos como tapial que se van reubicando a medida que avanza el desarrollo de la estructura; y en tercer lugar el bahareque es una técnica que se caracteriza por la aplicación de una mezcla de tierra, agua, paja y fibras animales y vegetales aglomeradas sobre una estructura de madera o bambú unida por entramados reticulados de la misma madera o bambú, como se observa en la Fig. 5.



Fig. 5 Técnicas de construcción en tierra [33].

Nota. De izquierda a derecha se presentan las técnicas de adobe, tapia pisada y bahareque.

En Colombia, cada región del territorio desarrollo y adopto cada una de las técnicas de construcción mencionadas según las necesidades y materiales disponibles. Por ejemplo, en la región andina se evidencia un mayor desarrollo de adobe y tapia pisada en la parte central del territorio para la fabricación de viviendas, en la zona fronteriza noreste se elaboraron muros estructurales con únicamente tapia pisada y en la zona occidental predomina el uso del bahareque y tapia pisada [3] como se observa en la Fig. 6.

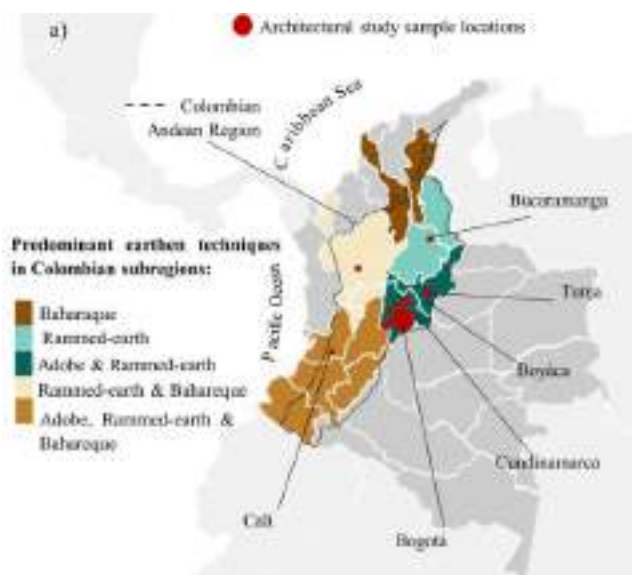


Fig. 6 Técnicas de construcción en tierra en Colombia [3].

Desde los años 30 del siglo XX, el uso de prensas manuales para la fabricación de elementos constructivos en tierra, como la CINVA – RAM, permitió la industrialización de las técnicas de construcción y con ello el surgimiento de nuevos materiales constructivos como el Bloque de Tierra Comprimida (BTC). Este es un elemento de albañilería fabricado a partir de la compactación de la tierra en estado húmedo, con o sin fibras vegetales, animales o sintéticas, dentro de un molde por

medio de la compresión o prensado mecánico generado por una palanca, seguido de un proceso de desmolde inmediato y curado bajo sombra; este proceso no requiere de quemado o cocción en horno debido a que la resistencia se adquiere por la compresión estática y fraguado de sus componentes y estabilizantes [34], [40]. Su facilidad de fabricación permite elaborarlo en diversas formas y tamaños, con o sin anclajes, en materiales cerámicos o de concreto convencional usados para cerramiento o mampostería portante como se muestra en la Fig. 7.



Fig. 7 Tipos de BTC [40].

Debido a que los BTC ofrecen una alternativa prometedora en la construcción con tierra, cada vez se utilizan con más frecuencia para la fabricación de muros de carga de baja a media altura, muros exteriores e interiores no portantes de estructuras residenciales, educativas, comunitarias y comerciales, muros divisorios y como elementos de fachada. Son adecuados para climas cálidos y secos debido a su masa termina y propiedades higroscópicas que ayudan a estabilizar las temperaturas y humedades interiores reduciendo la dependencia al aire acondicionado y otros requisitos de calefacción. Dentro del proceso de fabricación, los procesos de preparación del material pueden generar cambios granulométricos que influyen en la cantidad y calidad de la mezcla disponible para llenar el volumen requerido del molde, para evitar este tipo de inconvenientes es necesario garantizar las propiedades adecuadas de la tierra antes y después del proceso de elaboración como la variación dimensional (± 3 mm), resistencia a la compresión ($\geq 2,0$ MPa en promedio) y absorción de agua ($< 20\%$ en promedio) [34], [41]. Además, el suelo para la producción de BTC debe contener un porcentaje de arena superior al 50% distribuidas de manera continua entre arena gruesa, media y fina; por otra parte, los valores de plasticidad en términos de limite liquido debe ser menor o igual al 45% e índice de plasticidad menor al 18% [34].

B. Revestimientos en tierra

Estos sistemas de construcción se enfrentan a importantes retos técnicos, sociales y regulatorios en los que se incluyen el mejoramiento de su resistencia mecánica relativamente baja,

vulnerabilidad al agua y a la abrasión, y los efectos de contracción que comprometen la durabilidad de las estructuras; por lo tanto, es necesario hacer uso de elementos constructivos compatibles que permitan la protección y mejoramiento de propiedades intrínsecas del material como lo son los revestimientos o revoques en tierra.

Los revestimientos se definen como materiales en estado pastoso que se colocan sobre las superficies de materiales pétreos y quedan adheridos a estas por acción mecánica de la rugosidad y porosidad de la superficie y las partículas sólidas (pigmento) del revoque. Su principal función es proteger la superficie de soporte o muro de agentes exógenos que puedan afectarla o degradarla. Se clasifican dependiendo de sus componentes, textura, lugar de aplicación y uso en: revoques de cal, cemento o tierra; lisos o rugosos; grabados o estarcidos; externos o internos; industriales, de vivienda o de aplicación en el patrimonio [5], [42].

Hasta finales del siglo XVII, el uso de revestimientos en base a materiales pétreos o barro y componentes de origen orgánico e inorgánico en Colombia servían como material de protección para muros de tapia, adobe y bahareque; se considera que el 90% de los centros históricos del país están protegidos con enlucidos de tierra. Estos elementos son fabricados con materiales renovables, biodegradables y de bajo consumo energético en su proceso de producción; como resultado de su aplicación se obtiene una superficie con acabado óptimo en cuanto a confort térmico y acústico, inocua para personas, animales y plantas en contacto directo ya que no producen alergias e hipersensibilidad, que reduce los costos de materiales industrializados en un 30% y no requiere de mano de obra o maquinaria especializada para su producción, comercialización y aplicación, e imita la textura y color de materiales térreos. Para que cumplan su función protectora, es necesario controlar la dosificación de los aditivos y estabilizantes que permiten una mayor resistencia e impermeabilidad, así como también su durabilidad ante condiciones climáticas deteriorantes como la radiación solar, la humedad, el viento, los microorganismos y los contaminantes atmosféricos primarios y secundarios [5].

Los componentes principales de los revestimientos en tierra, usados para la conservación del Patrimonio Cultural son: tierra, estabilizantes y/o aditivos, y agua. En primer lugar, la tierra más apropiada para producir revestimientos es aquella que contenga partículas menores de 5 mm de diámetro con menos del 50% de su peso en partículas finas debido a que presentarían grandes procesos de expansión y compactación por cambios volumétricos, pero tampoco se recomienda que no posean arcillas o valores de estas menos del 15% de su peso debido a que carecería de

aglomerante suficiente para adherir el revoque en la superficie, otras propiedades importantes del suelo para revoques se presentan en la Tabla 2.

TABLA II
PROPIEDADES FÍSICAS DE REVESTIMIENTOS DE TIERRA [5]

Propiedad	Valor
Densidad seca (KN/m ²)	15 a 19
Volumen de poros abiertos (%)	30 a 40% en diámetro de 10 a 100 nm
Dilatación térmica (mm/m por °C)	0,012
Conductividad térmica (W/ (K x m))	0,8
Calor específico (Kcal/kg)	0,2
Amortiguamiento del sonido	500 Hz es de 56 dB para un muro de 40 cm de espesor
Permeabilidad (cm/s)	1 x 10 ⁻⁶
Resistencia a la tracción (MPa)	1/5 de la resistencia a la compresión
Módulo de elasticidad (MPa)	De 300 a 1000 en material seco De 700 a 30,000 en material húmedo
Tensión de compresión, tracción y cizallamiento (MPa)	Compresión = 0,2 Tracción = 0 Cizallamiento = 0,03

En cuanto a los estabilizantes y/o aditivos, existen sistemas de consolidación, impermeabilización, tratamientos químicos y aglomerantes que se basan en la compactación de las partículas del suelo para aumentar la fricción interna, adicionar elementos bituminosos o de cal como el silicato de sodio o cloruro de sodio y la cohesión sin afectar la humedad por medio del endurecimiento al contacto con el aire o agua; los aditivos principalmente tienen la función de potenciar y mejorar las propiedades del suelo natural, son de origen orgánico e inorgánico, vegetal, animal o sintético como: la leche, el huevo, los jugos vegetales con polisacáridos, lípidos y proteínas, las resinas de acetato de polivinilo (PVA_C), la soda caústica, sulfatos de lignina, compuestos plásticos y silicatos de sodio. Finalmente, el contenido de agua de los revoques depende de su uso, generalmente la mezcla de revestimiento no debe contener más del 30% de agua respecto al peso de este [5].

Uno de los revestimientos de uso cotidiano más aplicado para el embellecimiento y protección de las superficies son las pinturas. La pintura es un sistema de suspensión de partículas sólidas conocidas como pigmentos en un fluido disolvente que se fija a las superficies por la acción de una capa de aglomerante o aglutinante; a través de la historia, los avances científicos y

tecnológicos de la industria ha permitido desarrollar una gran variedad de pinturas con aditivos sintéticos que aumentan la resistencia del material al agua, a la radiación UV, a la ataque de microorganismos y a la presencia de contaminantes atmosféricos. Las pinturas se formulan en base a las demandas del mercado, para esto se prueban una serie de interacciones entre las variables (pigmento, disolvente y aglomerante) hasta obtener la formulación más adecuada que cumpla con una serie de requisitos específicos en cuanto a la dureza, flexibilidad, resistencia a la abrasión y a los álcalis, adherencia, a las temperaturas, volatilidad, poder cubriente, solidez a la luz, tamaño de partícula, geometría y dispersabilidad [43], [44].

El proceso de formulación inicia con el establecimiento de criterios que determina la elección de las materiales primas, la forma de mezclado, el rendimiento y costo final del producto. Uno de los criterios más usados es la **concentración volumétrica de pigmento (PVC)** mediante el cual se relaciona el volumen del pigmento y el volumen de aglomerante como se muestra en la ecuación. un valor de PVC igual a 100% refleja una pintura con solamente pigmento y un valor de 0% refleja una pintura con solamente aglomerante, entre estos dos limites se puede producir una gama de pinturas con diversas propiedades [44].

$$PVC = \left(\frac{V_{pigmento}}{V_{pigmento} + V_{aglomerante}} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación (1)}$$

Para pinturas de tierra, el manual de fabricación Cores da Terra ha establecido diferentes porcentajes de aglomerante a partir del contenido de pigmento calculado, valores de pigmento menor a 15%, entre 15 a 30% y mayores a 30% requieren un volumen de aglomerante de 60%, 40% y 20% respecto al volumen de pigmento respectivamente para que la formulación contenga un equilibrio en sus propiedades reológicas; por ejemplo, la aplicación de estas pinturas de tierra con brocha exigen evitar salpicaduras y aparición de marcas de las pinceladas durante el proceso de secado de la película. El control de los factores reológicos de las pinturas se consigue con la selección adecuada de los componentes, el ajuste de viscosidad a partir del control de pH y la estabilidad en la dispersión de los agregados de partículas [45].

La estabilidad en la dispersión de los aglomerantes de partículas del suelo a través de métodos mecánicos y métodos químicos son otro factor que influye en la calidad de las pinturas. Métodos mecánicos como la cavitación ultrasónica favorecen la presencia de fuerzas de repulsión a través de la aplicación de ondas ultrasónicas que generan ciclos fluctuantes de alta presión

(compresión) y baja presión (rarefacción), cuyo ritmo depende de su frecuencia, para crear pequeñas burbujas de vacío en ambientes de baja presión que colapsan violentamente en ambientes de alta presión del líquido produciendo la cavitación del medio y propulsión de corrientes a grandes velocidades. Por otra parte, los métodos químicos como la modificación del potencial eléctrico de las partículas aglomeradas utilizando cationes intercambiables, hace que el valor zeta negativo o positivo tienda a elevarse para repeler las partículas entre sí y disminuir la tendencia a la floculación [46], como se muestra en la Fig. 8.

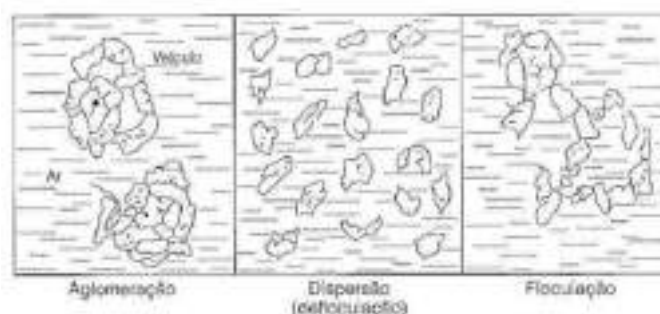


Fig. 8 Proceso de desaglomeración de partículas de pigmento [46].

En cuanto a los componentes de la pintura, el pigmento es un material sólido coloreado que pasa su efecto de color a otro material cuando se suspende adecuadamente sobre el sustrato al aplicarlo en forma de una capa superficial delgada. Se mezcla con la parte líquida de la pintura y permanece dispersa o suspendida en la misma pero también puede aparecer en forma aglomerada como se muestra en la Fig. 9.

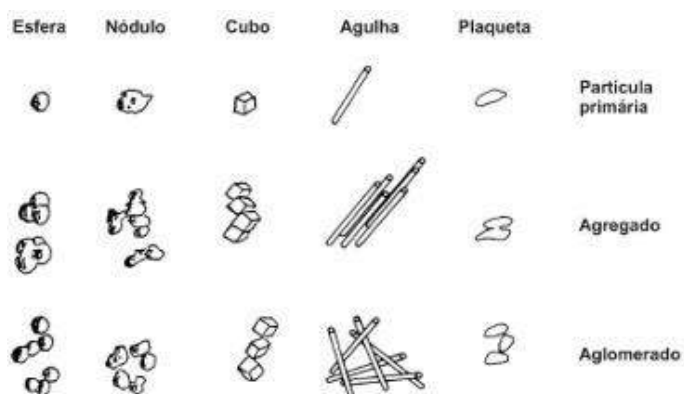


Fig. 9 Formas y estados de las partículas de pigmento [44].

Se clasifica de acuerdo con su origen en pigmento mineral o inorgánico (tierra natural, tierra calcinada, colores sintéticos) y en pigmento orgánico animal, vegetal o sintético, y con su forma en pigmento esférico, cubico, nodulares (irregularmente esférico) o laminar; la variación de su forma cristalina se debe a la naturaleza química y el proceso de obtención. Los pigmentos de las

tierras naturales se obtienen a partir de procesos de meteorización fisicoquímica y biológica de los minerales primarios de la roca madre, en especial minerales arcillosos; entre las propiedades del suelo que controlan la calidad de las pinturas se encuentran la mineralogía de la fracción fina o arcillosa, que influye en el comportamiento dinámico, y la textura del suelo que representa la distribución de los tamaños de partículas que conforman el suelo. En suelos tropicales, la fracción arcillosa de la tierra está compuesta de minerales de silicatos oxidados que tiene forma laminar que tienden a encajar cara a cara aumentando la cohesión entre laminas y formando una masa compacta e impermeable; la carga eléctrica superficial en estas laminas controlan la formación de agregados y la floculación a través de enlaces entre los bordes, las superficies o entre borde – superficie generando así una interacción de gran interés por capilaridad, fuerzas electromagnéticas y fricción [43], [44] como se observa en la Fig. 10.

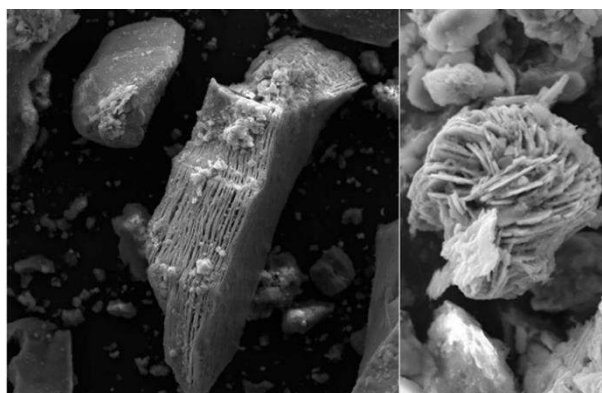


Fig. 10 Forma microscópica de arcillas coloidales [43].

Las interacciones de las fuerzas de atracción entre las partículas finas del suelo, como las fuerzas de Van der Waals, resultan de tensiones interfaciales y la acción de moléculas de agua como elemento disolvente dieléctrico por medio del cual se unen las micelas de arcilla con granos inertes de limo o arena fina; por otra parte, los enlaces por fricción que se deben a la rugosidad superficial de las partículas permite que las arcillas actúen con el aglutinante generando diversos agregados que se clasifican como micro agregados (unión de arcilla, limo y arena) o macro agregados (unión de varios micro agregados) [44] como se observa en la Fig. 11.

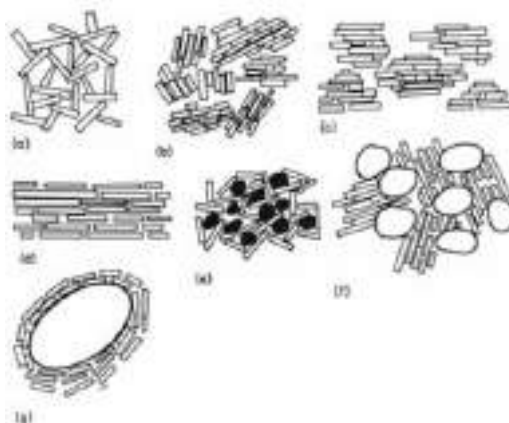


Fig. 11 Disposición y forma de los agregados que se generan entre las partículas finas de los pigmentos minerales de pinturas [44].

Nota. (a) árido compuesto por partículas al azar; (b) agregado compuesto por partículas aleatorias; (c) agregado compuesto por partículas en alineación paralela; (d) agregado compuesto por láminas paralelas; (e) partículas granulares de óxido férrico, materia orgánica o limo fino; (f) áridos orientados al azar empaquetados entre granos de limo; (g) partículas de arena más grandes que permiten la alineación de las capas de arcilla paralelas a sus márgenes.

Por otra parte, el disolvente o solvente de las pinturas son productos que se usan para solubilizar el pigmento y aglomerante manteniéndolos en una mezcla homogénea; proporciona una viscosidad adecuada para recubrir la superficie y mantener algunas propiedades en estado húmedo que permite la formación adecuada de la película seca sobre el sustrato. En pinturas en base agua, el solvente actúa como agente coalescente que ayuda a controlar la tasa de evaporación y la solubilidad del pigmento a medida que la película se va secando. Las propiedades que caracterizan el solvente son poder de solvencia, tasa de evaporación, punto de inflamación, estabilidad química, tensión superficial, color, olor, toxicidad, biodegradación y adecuada relación costo – beneficio [44], [46].

El aglomerante de las pinturas es una sustancia no volátil que permite aglomerar las partículas de pigmento entre ellas y con el sustrato al que se aplican. En la antigüedad los aglomerantes se basaban en compuestos naturales, vegetales y animales, dentro de los más usados se encuentran el aceite de linaza, la caseína, la albumina, el almidón o fécula de papa, maíz, arroz y yuca, la harina de trigo, la cera de abeja, la sangre y los jugos (mucilago) de tallos y hojas de algas, cactus, plátano y sábila [5], [46]. En la actualidad se usa una variedad de aglomerantes

sintéticos que confieren a la pintura propiedades específicas de protección; a continuación, se hace una breve descripción de los aglomerantes usados para el desarrollo de este proyecto.

El **almidón de yuca** es una macromolécula natural biodegradable ampliamente usada en el sector de alimentos, textiles, fabricación de papel y adhesivos debido a su alto poder de absorción de agua y adhesión en superficies por la gelatinización del almidón, además de su alta consistencia, viscosidad, estabilidad a cambios de pH y temperatura, y dispersión. Se forma a partir de la deshidratación de la unidad de glucosa a través de un enlace glucosídico (C-O-C) en las estructuras de la amilosa y la amilopectina, ambas moléculas se caracterizan por su grado de polimerización o ramificación lo que afecta su comportamiento ante procesos de degradación y propiedades fisicoquímicas y funcionales como el tamaño de los gránulos; en soluciones diluidas los gránulos de almidón favorece la formación de películas fuertes a través de la asociación intermolecular de las moléculas de amilosa y amilopectina en un fenómeno hidrotérmico conocido como retrogradación [47], [48].

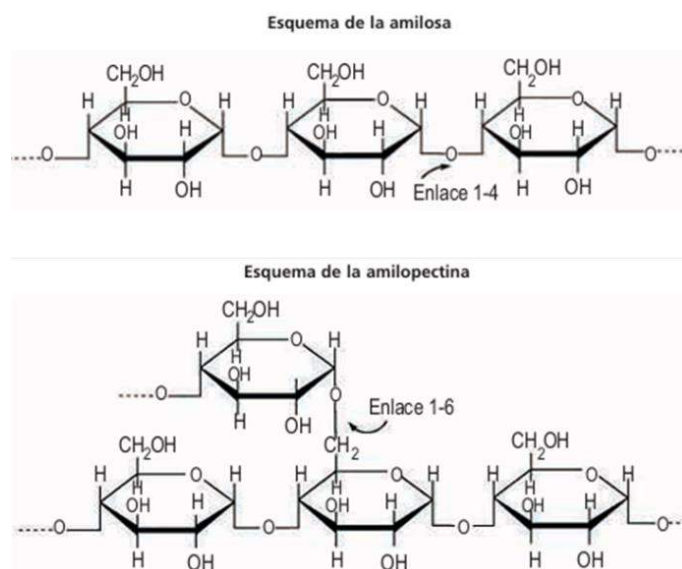


Fig. 12 Estructura química de la amilasa (arriba) y amilopectina (abajo) [47].

Los gránulos organizados de almidón son uniformes en tamaño y forma, con apariencia redondeada y terminales truncados con un núcleo definido, su tamaño varía entre 4 a 35 μm con un promedio de 20 μm ; durante tratamientos hidrotérmicos, los gránulos sufren una serie de modificaciones que influyen en la formación de estructuras semi o completamente cristalina con propiedades específicas como la polarización de la luz y difracción de rayos X, estas modificaciones pasan por una serie de fases como la gelatinización, gelificación y retrogradación

que causan hinchamiento, hidratación, fusión y ruptura de los gránulos [47] como se muestra en la Fig. 13.

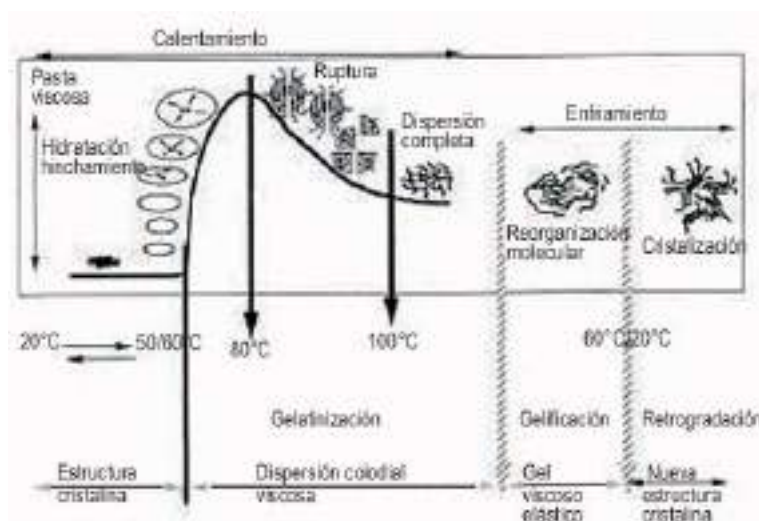


Fig. 13 Cambios de los gránulos de almidón durante procesos hidrotérmicos [47].

El almidón de yuca que gelatiniza a temperaturas relativamente bajas hace que la viscosidad de la pasta inicialmente alta decaiga bruscamente con agitación continua y no se produzca la formación de gel en presencia de un enfriamiento subsecuente; por lo tanto, las pastas de almidón de yuca son aglomerantes estables ante procesos de congelación, disminuye la exudación del agua o la sinéresis de la estructura de la pasta y soporta medios ácidos por debajo de un pH de 2,4 debido a la hidrólisis parcial o total del cristalino [47].

El **mucilago de nopal** es una sustancia hidro – coloidal hetero polisacárida con residuos de arabinosa, galactosa, ramnosa y xilosa como azúcares neutros de una estructura molecular poli electrolítica altamente ramificada [49]. Se encuentra en la medula central del tronco y cladodios (pencas maduras) del nopal (*Opuntia spp.*), planta arbustiva que adquiere una altura promedio de 3 a 5 m y se desarrolla en zonas áridas de escasa precipitación, limitada por las haces vasculares o fibras leñosas del xilema recubiertas de una parénquima clorofílica verde muy abundante y recubierta por la epidermis [50], [51] como se muestra en la Fig. 14. Químicamente, contiene un polímero lineal compuesto por polisacáridos emparentados con pectinas que mejora la adherencia superficial de revestimientos y morteros de tierra [50].

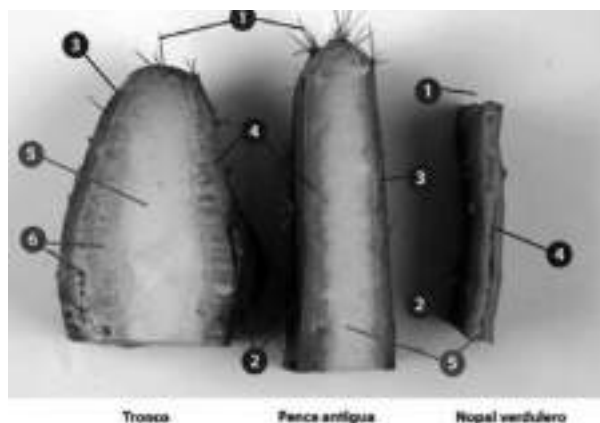


Fig. 14 Partes del nopal (*Opuntia spp.*) [50].

Nota. (1) Espinas, (2) Cutina, (3) Epidermis, (4) Parénquima clorofilano, (5) Parénquima colector o mucilago, (6) Xilema.

Por otra parte, el **acetato de polivinilo** (PVAc) es un polímero sintético producido de unidades de monómero de cloro acetato de vinilo que se producen generalmente a través de la reacción entre el ácido acético y el acetileno en presencia de sales de mercurio catalizadoras. La presencia de enlaces dobles en su estructura hace que las unidades monómeras se polimericen entre sí y formen largas cadenas con átomos de carbono unidos por medio de enlaces covalentes simples como se observa en la Fig. 15. Desde 1950, este aglomerante se ha usado en pinturas de calidad artística y para el hogar, en geles de limpieza, barnices, recubrimientos y materiales de retoque debido a que es una sustancia incolora, soluble en cetonas, ésteres, alcoholes e hidrocarburos aromáticos y termoplástico que exhibe suavidad y flexibilidad a temperatura ambiente durante la formación de película seca; sin embargo, presenta inestabilidad en la difusión interna y evaporación superficial de las películas de pinturas cuando no se encuentra adherido por enlaces químicos primarios a la cadena polimérica principal, esto provoca en la superficie una película quebradiza con espacios idóneos para el depósito de partículas de polvo y otros contaminantes atmosféricos que aceleran los procesos de degradación por hidrólisis, oxidación, envejecimiento con luz UV y ataque microbiano [52].

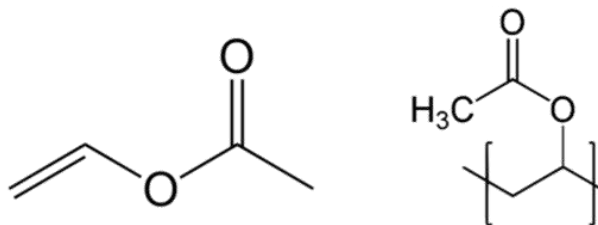


Fig. 15 Estructura química del acetato de polivinilo (PVAc) [52].

C. Procesos de deterioro de la arquitectura en tierra

Sobre las construcciones en tierra típicamente suele manifestarse diversas patologías que producen erosión de los materiales pétreos si no se encuentra protegido por una adecuada cubierta o cimentación[32]. Las causas de deterioro se clasifican en factores intrínsecos asociados con la composición del material o técnica constructiva, y extrínsecos asociados al ambiente y acciones del ser humano; los factores que más afectan las construcciones en tierra son en primer lugar la acción del agua (en forma de lluvias torrenciales o acidas, granizadas, inundaciones y cambios de temperaturas), y en segundo lugar la acción de contaminantes atmosféricos y mala calidad del aire [53] como se observa en la Fig. 16.



Fig. 16 Agentes deteriorantes de las fachadas de edificaciones [30].

La acción del agua, como proceso de deterioro, se evidencia a través de ciclos de humedecimiento y secado, ciclos de congelación y ciclos de absorción capilar; en el primer caso se inicia la saturación de los muros expuestos a través de precipitaciones que migra sales solubles de la superficie para posteriormente ser cristalizadas y generar erosión, en segundo lugar la saturación se inicia con precipitaciones de lluvia y nieve simultáneamente que se congela y se acumula en los poros de la superficie para cristalizarse y expandirse en el interior de la estructura, y en tercer lugar la saturación del muro inicia por la elevación de agua desde la base provocando erosión de material y surgimiento de eflorescencias[54].

El desarrollo industrial y la tendencia al incremento de consumo por parte de la población ha provocado que las concentraciones de contaminantes atmosféricos aceleren los procesos de deterioro de fachadas con el paso del tiempo, los principales contaminantes, como el SO_x , NO_x , CO_2 , O_3 , COV_s y PM se pueden encontrar en forma gaseosa o en suspensión en la atmosfera. Focos

puntuales de contaminantes atmosféricos producen daños localizados en las fachadas como ensuciamiento, decoloración o tinciones, formación de eflorescencias salinas y costras negras, disoluciones y pérdida de cohesión [55]. Junto a estos contaminantes, los cambios climáticos, que se presentan en forma abundante, provocan cambios en las propiedades fisicoquímicas de las partículas finas de los revestimiento por cambios volumétricos, disminución de densidad, aumento de plasticidad y dispersión por escorrentía, acumulación de compuestos orgánicos y crecimiento de organismos[5]. Para evitar los procesos de deterioro es importante que las fachadas se mantengan hidrofóbicas sin obstruir la difusión del vapor de la estructura al medio ambiente, es decir, que sea porosa o con una red de microporos que permita la transpiración del agua de la estructura [56].

En conjunto estos dos factores propician el desarrollo de otro proceso de deterioro conocido como biodeterioro, el cual se define como el cambio indeseable en las propiedades de un material causado por la actividad vital de los organismos vivos. La mayoría de los organismos en las fachadas generan sustancias que alteran irreversiblemente el material constructivo de manera física, química y estéticamente. Los principales parámetros que condicionan el crecimiento y formación de colonias de microorganismos en las fachadas son la luz porque permite la fotosíntesis de organismos autótrofos, el oxígeno que influye en los procesos de respiración celular, el carbono que forma parte de los polímeros que componen la estructura celular de organismos y es asimilado fácilmente por especies autótrofas y heterótrofas en procesos foto y quimio sintéticos, el nitrógeno por poseer la misma importancia del carbono, el agua por ser indispensable en los procesos metabólicos del organismo y los cambios del ambiente, y la temperatura y pH del medio que influyen en la velocidad de crecimiento de los microorganismos.

La secuencia en el tiempo por medio de la cual aparecen los organismos en las fachadas de construcciones en tierra inicia con bacterias autótrofas quimiosintéticas, algas y líquenes, continua con bacterias heterótrofas, actinomicetos y hongos que constituyen las biopelículas que sirven como base para el crecimiento de plantas vasculares [9] como se observa en la Fig. 17.

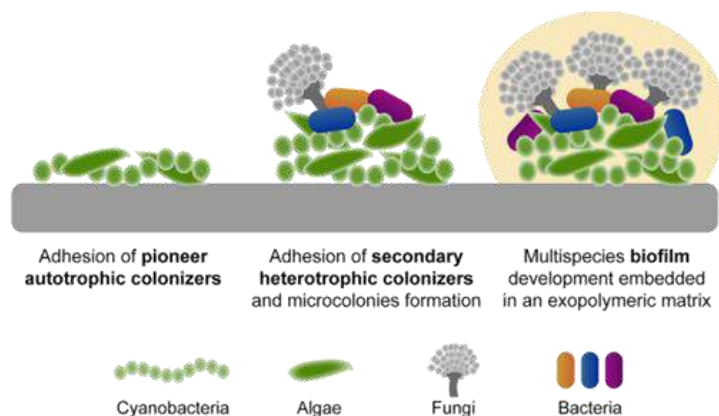


Fig. 17 Tipo de organismos colonizadores biodeteriorantes de fachadas [21].

En el caso particular de los hongos, estos organismos heterótrofos se encuentran en mayor concentración en fachadas de regiones tropicales o cuando las condiciones de humedad relativa y temperatura del medio ambiente son elevadas. La presencia de especies fúngicas en las fachadas se reconoce a partir de la formación de manchas superficiales de pigmentos oscuros y presencia del micelio que penetra a profundidad las capas de revestimiento causando pérdida de cohesión del sustrato y corrosión por picadura conocido como Pitting. Los hongos causantes de deterioro se pueden clasificar como mohos o hongos de pudrición, los primeros atacan la superficie a través de las hifas y esporas, y los segundos atacan las propiedades físico-mecánicas del material a través de sus procesos metabólicos como descomposición de alimento en enzimas. La descomposición física de la superficie por causa de estos organismos se evidencia por el desprendimiento de películas de recubrimientos, disgregación de fibras y penetración del micelio en la estructura interna, y la descomposición química se basa en alteraciones en la composición mineral, corrosión y dilución de partículas; este último proceso de deterioro tiene una fuerte relación con la disminución del pH o acidificación generada por la producción de ácidos cítrico, oxálico, glucónico, glucurónico, láctico y fumárico que conforman complejos de quelación con los cationes metálicos del sustrato disolviendo minerales carbonatados, de silicatos, de hierro, de magnesio y de fosfatos [9].

El control del crecimiento de los agentes causantes de biodeterioro se realiza con diversos métodos de prevención aplicados para inhibir o disminuir la velocidad del desarrollo biológico de manera indirecta o directa, es decir, la aplicación se puede realizar sobre los factores que condicionan la presencia del organismo o sobre los sistemas mecánicos, físicos y químicos que intervienen sobre los agentes biológicos. En primer lugar, los métodos indirectos, que suponen la inhibición o disminución del crecimiento por modificación de condiciones como la humedad, la

temperatura, los nutrientes o factor del sustrato, en muchas ocasiones tienen un efecto limitado en la inhibición de crecimiento y requieren complementarse con métodos de apoyo en las estructuras como cubiertas o tratamientos consolidantes e hidrófugos de manera periódica; en segundo lugar, los métodos directos, que consisten en la aplicación de tratamientos de esterilización de los organismos en un periodo de tiempo determinado, son más efectivos a lo largo del tiempo y entre ellos se encuentran tratamientos mecánicos, físicos, biológicos, químicos y consolidantes e hidrófugos [9]. En la Tabla 3 se presenta una breve descripción de cada método directo mencionado.

TABLA III
TRATAMIENTOS DIRECTOS PARA EL CONTROL DEL BIODETERIORO EN
FACHADAS [9]

Tratamiento	Descripción
Mecánico	Se basan en la remoción física de los agentes deteriorantes con instrumentos manuales como bisturí, espátulas, cepillos, aspiradoras. Son empleados de manera simple y frecuente, no dan resultados eficientes a largo plazo, causan deterioro físico en la superficie.
Físico	Se basan en la interacción con el material genético del agente deteriorante a partir de radiaciones ionizantes electromagnéticas (UV, Gamma o Beta), calentamiento, congelación y aplicación de laser en diferentes pulsos y longitudes de onda en combinación con la reducción de elementos condicionantes de la atmosfera como el oxígeno
Biológico	Se basan en el uso de organismos antagonistas o parásitos que limiten el crecimiento de los agentes deteriorantes
Químico	Se basan en el uso de sustancias químicas (compuestos inorgánicos, alcoholes, derivados de fenol, sales de amonio, piridinas, sustancias carbonatadas y mezclas de estos) que eliminen los organismos de las superficies actuando como biocidas o pesticidas.
Consolidante	Se basa en el uso de productos que, además de proteger el sustrato, mejoran la cohesión y adhesión de las capas de revestimientos al sustrato. Los productos más usados son de tipo inorgánico, organosilicatos y orgánicos sintéticos.
Hidrofugo	Se basa en el uso de productos que, además de proteger el sustrato, reducen la absorción del agua en forma líquida a través de la superficie sin generar alteraciones estéticas y en la evaporación de la humedad de la estructura manteniendo la “respiración” del material a través de la formación de una red de moléculas que no obstruyen poros o capilares.

D. Nanotecnología en la conservación del Patrimonio Cultural en tierra

En la última década, un método innovador para la conservación del Patrimonio Cultural ha sido desarrollado a partir de la manipulación de materiales consolidantes e hidrófugos con tamaños inferiores a 100 nm. Nuevos sistema de tratamientos como las nanopartículas de óxidos metálicos ha proporcionado a la superficie expuesta la capacidad de autolimpieza y mejora de sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas a largo plazo [57]. Uno de los materiales más estudiado y aplicado como tratamiento de conservación de superficies es el dióxido de titanio o TiO_2 , este material semiconductor inorgánico se encuentra naturalmente en la corteza terrestre, es el elemento químico número nueve más común y pertenece a los óxidos metálicos de transición [58]. Tradicionalmente se ha utilizado como pigmento de coloración blanca por tener un peso molecular de 80 g/mol, una densidad relativa de 4,26 g/cm³ y una capacidad de absorber longitudes de onda inferior a 380 nm [59]. Se puede encontrar en la superficie terrestre en tres formas cristalinas, en un 99 a 94% en fase rutilo, en un 95 a 90% en fase anatasa y en un 90% en fase brookita [58]. De las formas cristalinas que se observan en la Fig. 18; la fase anatasa y rutilo son las más importantes en las aplicaciones prácticas de la fotocatalisis debido a su alta fotoactividad y estabilidad química, la fase anatasa, que es más fotoactiva, contiene una energía de banda prohibida ligeramente mayor a la fase rutilo con un valor de 3.2 eV, lo que equivale a una longitud de onda de 388 nm que pertenece al espectro de luz UV) [60], que hace que el mecanismo fotocatalítico sea más eficiente frente a diversas condiciones climáticas y agentes contaminantes.

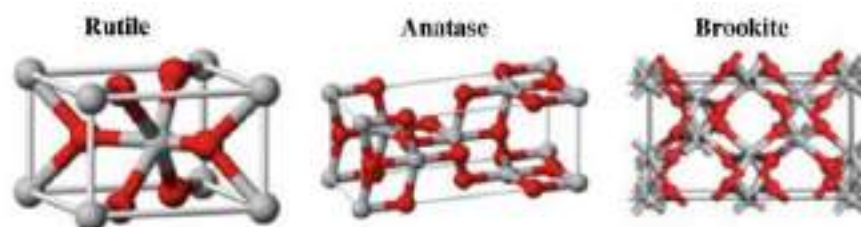


Fig. 18 Tipo de organismos colonizadores biodeteriorantes de fachadas [58].

El mecanismo fotocatalítico por medio del cual se adquieren propiedades de autolimpieza se puede explicar a partir de la teoría de bandas de valencia (h_{BV}^+) y de conducción (e_{BC}^-), el proceso de activación inicia cuando se absorbe radiación UV a partir de fotones de luz solar o lámparas fluorescentes ($h\nu$) y se transfieren a electrones entre las dos bandas mencionadas generando pares de electrón – hueco. Los electrones que se transportan de la banda de conducción a la banda de valencia tienen un fuerte poder reductor al reaccionar con moléculas de oxígeno para producir radicales de super oxido (O_2^-); por otra parte, los huecos disponibles en la banda de

valencia quedan cargados positivamente para reaccionar con moléculas de agua del medio o del sustrato y formar como producto radicales hidroxilos (OH^\cdot) y moléculas de hidrogeno (H^+). Cuando las especies reactivas de oxígeno (ROS) o radicales libres producidos reaccionan con moléculas inorgánicas del sustrato o del medio ambiente, como células de microorganismos o contaminantes atmosféricos, se producen compuestos oxidativos inertes que posteriormente se incorporan a los ciclos de elementos como el carbono o nitrógeno [30]. Durante este proceso fotocatalítico, el material semiconductor permanece inalterable y los pares de electrón libre – hueco se desplazan en la superficie del material semiconductor para continuar produciendo especies oxidantes [61]. Las siguientes ecuaciones resumen el proceso que se muestra en la Fig. 19 y descrito previamente.

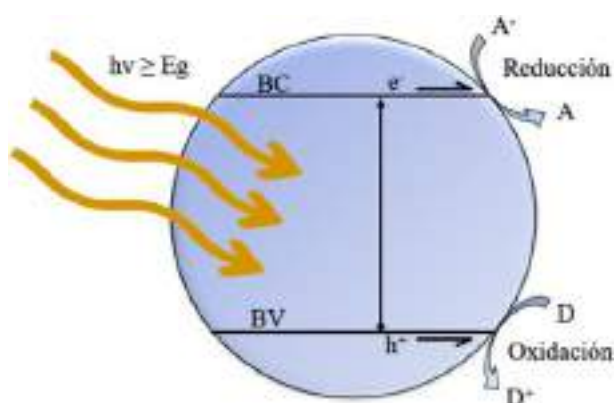
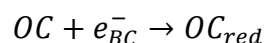
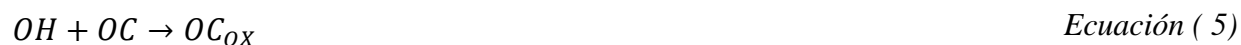
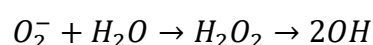


Fig. 19 Proceso de fotocatalisis en dióxido de titanio (material semiconductor) [30].



Desde 2011, su producción ha superado un valor de 10.000 toneladas anuales debido a una alta demanda de este material en tamaño nanométrico por sus propiedades fotocatalíticas [62] y otras ventajas como: ser un material de bajo costo, con fuerte resistencia oxidante, alta estabilidad química, alto índice de refracción y presencia de vacantes de oxígeno en su red que le permite absorber del 3 al 4% de la energía solar para eliminar compuestos orgánicos de sustratos como el

agua, aire y suelo [63]. Los métodos de síntesis más comunes son el método Top – Down y el método Bottom – up; el primero se basa en la reducción del tamaño de material de escala macrométrica a nanométrica a través de procesos fisicoquímicos como la pulverización catódica, descargas de alambre, molienda, laser pulsado, reacciones de evaporación – condensación, entre otras; y el segundo se basa en el autoensamblaje de los átomos del material en nuevos núcleos a escala nanométrica a través de procesos químicos y/o biológicos como la condensación de átomos en fase gaseosa o líquida conocida como sol – gel o sol – aerosol, tratamiento solvo o hidrotermal, tratamientos foto, sono o electroquímicos, pirolisis, reducción química e hilado, entre otros [62] como se muestra en la Fig. 20.

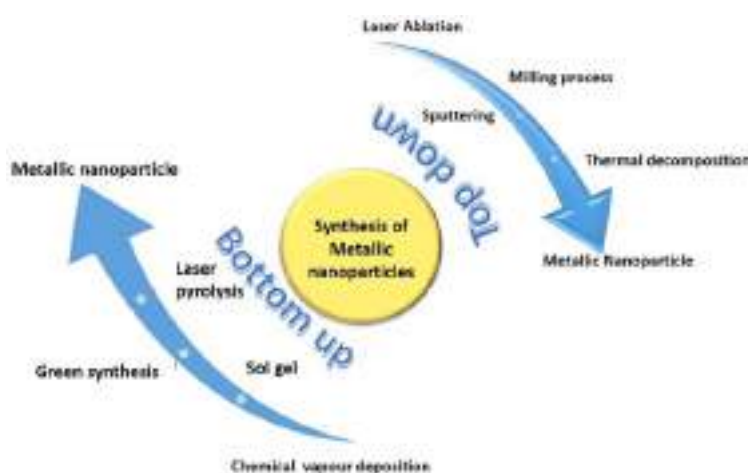


Fig. 20 métodos y procesos de síntesis de nanopartículas [64].

En su mayoría, estos procesos de síntesis mencionados presentan una desventaja muy importante y es la generación de residuos tóxicos al medio ambiente y para el ser humano; por lo tanto, la comunidad científica ha desarrollado procesos de síntesis más amigables con el medio ambiente y con el ser humano a partir del uso de diferentes componentes naturales de plantas y microorganismos que funcionan como agentes estabilizadores de los procesos de síntesis [62]. Hoy en día se conoce que la química verde con extractos de material vegetal es un proceso eficiente, con bajo impacto en el medio ambiente y la salud humana, y bajo gasto económico [65]; se basa en el aprovechamiento de compuestos fitoquímicos, que se encuentran en hojas, raíces, cascara, tallos, flores y frutos de material vegetal, para convertir iones metálicos de agentes precursores en nanopartículas estables a partir de un proceso simultáneo de reducción, nucleación y estabilización debido a que son fuentes de metabolitos secundarios y biomoléculas como flavonoides, terpenos, azúcares polifenoles y proteínas [66]. El proceso consta de tres fases principales: en primer lugar

se encuentra el proceso de activación por medio del cual los iones metálicos se reducen y pasan a una segunda fase conocida como nucleación y crecimiento en donde los iones se combinan para formar partículas más grandes con el aumento de la estabilidad térmica, y finalmente se produce la fase de determinación de forma y tamaño de las nanopartículas a través de la calcinación de los iones precipitados en ciclos de lavado con agua destilada y etanol, que sirven para eliminar iones y otros compuestos que no hayan reaccionado [62], [67] como se muestra en el esquema de la Fig. 21.

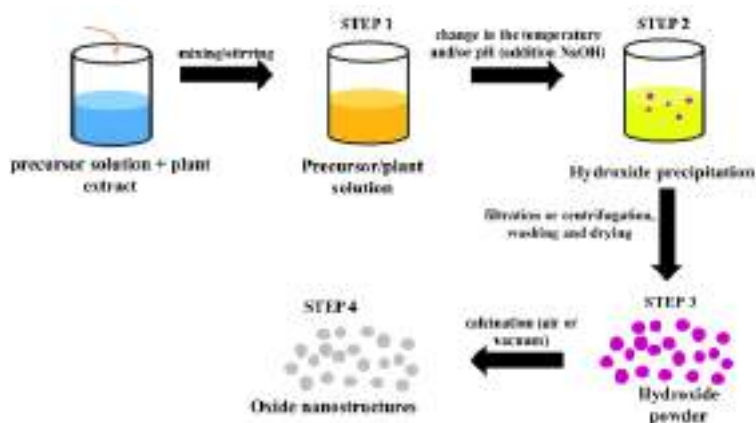


Fig. 21 Fases del proceso de síntesis de nanopartículas metálicas por química verde [67].

El proceso de síntesis de química verde también es conocido como proceso de coprecipitación y permite que los iones hidróxidos metálicos se cristalicen por medio de un tratamiento térmico de nucleación y crecimiento de partículas por liberación controlada de aniones y cationes de la solución a través de la modificación de variables como el tiempo de agitación, temperatura de agitación, pH de la solución, concentración de agentes bioreductores y precursores, cantidad de ciclos de lavado y temperatura de calcinación como se describe en investigaciones previas [24].

Actualmente existen nuevas empresas en el sector de la construcción que comercializan materiales fotocatalizadores para la conservación de superficies como pinturas, tejados, ventanas, filtros de aire, entre otros como se observa en la Tabla 4.

TABLA IV
EMPRESAS DEDICADAS A LA VENTA DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS
PARA LA PRESERVACIÓN DE SUPERFICIES [30]

Empresa	Producto	Nanomaterial
Bioni CS	Pinturas y recubrimientos antibacterianos y antifúngicos	Ag/TiO ₂
Industria Nanotech Inc.	Pinturas y materiales de revestimiento	TiO ₂
Jotun	Pinturas, recubrimientos y estucos	TiO ₂
Nanoguard	Pinturas y revestimientos	TiO ₂
Relius Roof	Pinturas, revestimientos y yesos para muros	Acrilico Nanotech

Los recubrimientos fotocatalíticos en forma de pinturas propicia la existencia se superficies interfaciales más grandes disponibles para la degradación de diversos contaminantes y organismos vivos a través del proceso de fotocátalisis [58]. Actualmente se desconoce el mecanismo exacto de inactivación de las células del microorganismo a través del proceso de fotocátalisis por la misma complejidad de la interacción; sin embargo, diversos estudios han documentado que debido al ataque prolongado de las ROS se crea un estrés oxidativo y nitrosativo en el microorganismo como se muestra en la Fig. 22. El proceso inicia con un daño en la pared celular y la membrana citoplasmática que perfora e induce a la fuga de sustancias internas y compromete la integridad estructural de la membrana y pared celular; posteriormente se ataca directamente los componentes intracelulares del organismo para inhibir la actividad de enzimas esenciales involucradas en procesos metabólicos de crecimiento y modulación de expresión de genes específicos en la biosíntesis de la pared celular y factores de virulencia, además de agotar los niveles de energía ATP privando las células de energía primaria para sus funciones celulares; por último, las ROS pueden llegar a interactuar con el ADN y dañarlo hasta el punto de provocar alteraciones genéticas y en la replicación, lo que a su vez también altera la estructura y función de proteínas de procesos mitocondriales, contribuyendo aún más en la disfunción celular e inhibición del crecimiento del organismo [30], [68].

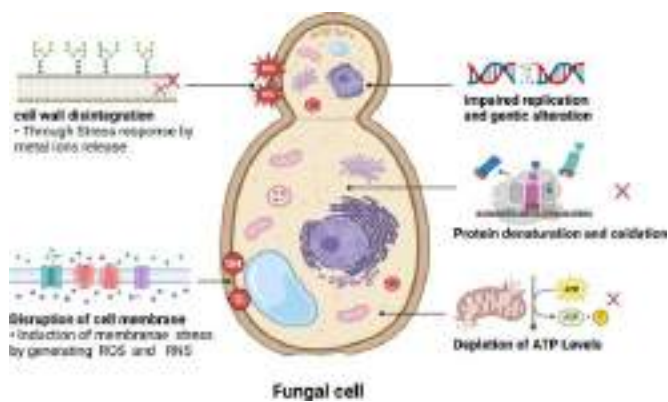


Fig. 22 Mecanismos de inactivación fúngica sugeridos, producidos por el proceso de fotocatalisis de nanopartículas [68].

V. METODOLOGÍA

Para el cumplimiento de los objetivos planteados se desarrolló la metodología que se observa en la Fig. 23, la cual consta de tres (3) etapas principales y nueve (9) actividades. A continuación se describen los procedimientos de los ensayos aplicados para el desarrollo experimental con enfoque cuantitativo de la investigación a escala de laboratorio.

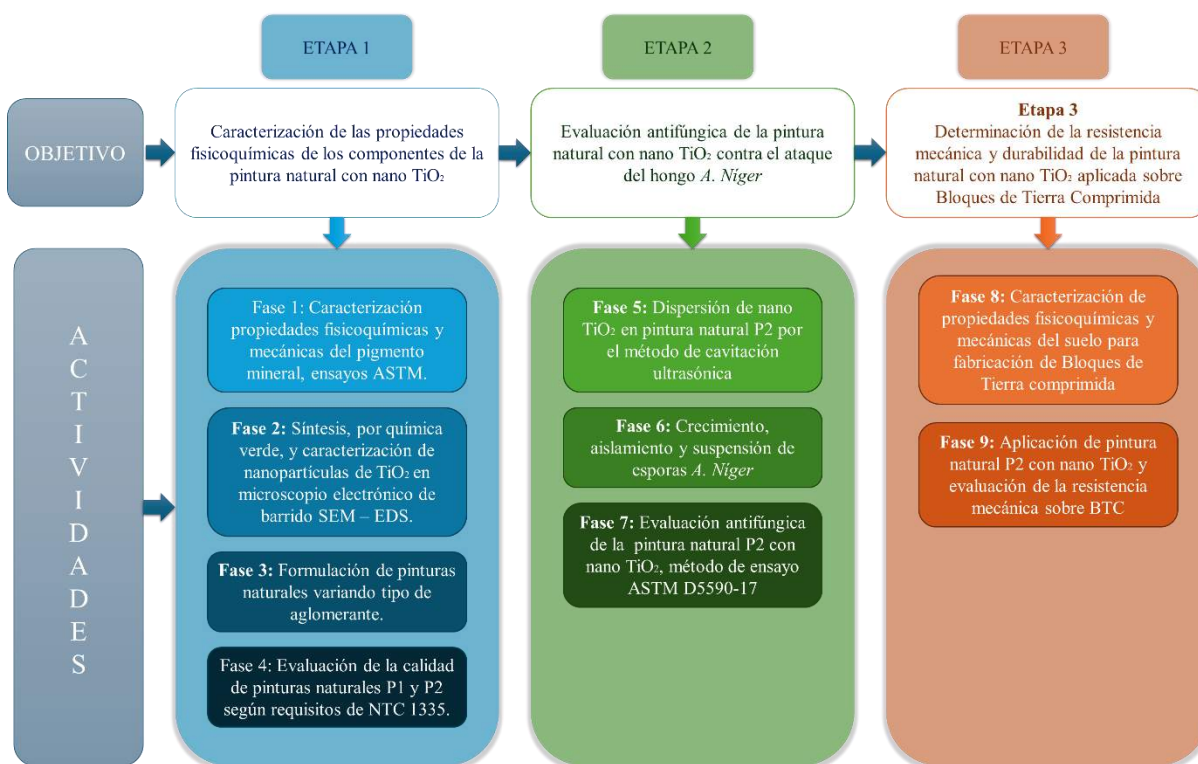


Fig. 23 Metodología del proyecto

A. *Etapa 1: Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los componentes de la pintura natural con nano TiO₂*

En esta primera etapa se caracterizaron inicialmente las propiedades fisicoquímicas y mecánicas del pigmento mineral, tales como textura, humedad, densidad, pH y conductividad eléctrica según métodos de ensayo ASTM.

Posteriormente, se caracterizaron las propiedades fisicoquímicas del nanomaterial, sintetizado a partir de un proceso de química verde, tales como la morfología, la distribución de los tamaños de nanopartículas de TiO₂ y su composición química elemental por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de energía dispersiva (EDS).

Finalmente, se realizó la preparación de dos tipos de mezcla de pintura natural con pigmento mineral, aglomerante sintético (P1) y aglomerante natural (P2), solvente acuoso y aditivos naturales (mucilago de nopal y sal en grano) para determinar la calidad de las pinturas respecto a los requisitos establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 1335 [69] por medio de la cual se establece la calidad de las pinturas o emulsiones Tipo 1 para uso en exterior, tales como la viscosidad, el volumen de material no volátil, el tiempo de secado para repintar la superficie, el grado de entizamiento y el cuarteamiento al aplicar un alto espesor.

1) **Fase 1: Caracterización propiedades fisicoquímicas del pigmento mineral:** Inicialmente se obtuvo una muestra aleatoria de suelo y se preparó para los ensayos fisicoquímicos y mecánicos que se encuentran en la Tabla 5. a través de un proceso de secado al aire y tamizado. Posteriormente se aplicaron los ensayos fisicoquímicos y mecánicos por triplicado como se muestra en la Fig. 24.

TABLA V

ENSAYOS FISICOQUÍMICOS REALIZADOS PARA EL PIGMENTO MINERAL

Ensayo	Referencia Normativa
Textura por el método de Bouyoucos	NTC 6299 – 2018 [70]
Humedad gravimétrica y Densidad real	NTC 6230 – 2017 [71]
Tamaño de partículas del suelo por el método de tamizado	ASTM D422-63 – 2007 [72]
Limite líquido, Limite plástico, Índice de plasticidad y Limite de contracción del suelo	ASTM D4318 – 2017 [73]
pH por el método del potenciómetro	ASTM D4972 – 2024 [74]
Conductividad eléctrica	NTC 5596 – 2008 [75]

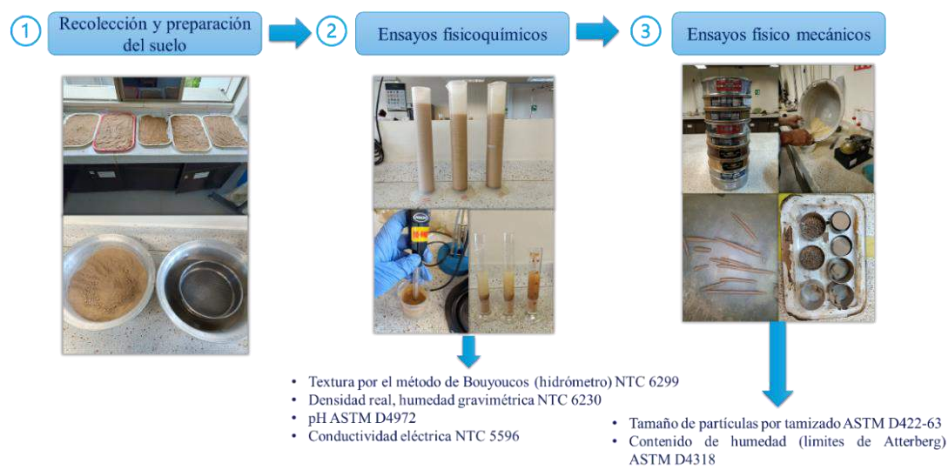


Fig. 24 Metodología caracterización propiedades fisicoquímicas del pigmento mineral

2) *Fase 2: Síntesis por química verde y caracterización de nanopartículas de TiO₂ en microscopio electrónico de barrido (SEM)*: Inicialmente se llevó a cabo el proceso de extracción de las biomoléculas reductoras (terpenos y flavonoides) de hojas de *Mentha Arvensis* y cristal de *Aloe barbadensis* mil a través del método de extracción Soxhlet y baño maría respectivamente, como se muestra en la Fig. 25.

Posteriormente se realizó la síntesis de nanopartículas a partir del método de coprecipitación, en el cual se mezcló 30 ml de los extractos vegetales obtenidos en proporción 3:1 (menta: aloe vera) con 5 ml de agente precursor (isopropóxido de titanio (IV)) durante 5 horas a una temperatura de 50°C en un nivel de agitación 5; previamente a la agitación, la solución requirió un ajuste de pH con NaOH al 10% y HCl al 25% gota a gota hasta llegar a un valor de 7,5. Seguidamente, se realizaron tres ciclos de lavado y centrifugación simultáneos usando agua destilada y etanol; el lavado se realizó completando un volumen de 10 ml en tubos de centrifuga que se agitaron durante 15 minutos a 5000 rpm. Para completar el proceso, el material sedimentado del proceso de centrifugación se llevó a calcinar en mufla durante 5 horas a 500°C, y una vez finalizado este proceso se dejó enfriar el material sólido obtenido para tritararlo con un mortero y obtener un polvo fino de coloración blanca representativo de nanopartículas de TiO₂ [24].

El análisis de la morfología, distribución del tamaño de las nanopartículas y composición química elemental se realizó a través de la obtención de micrografías de 10 kx, 50 kx, 100 kx y 250 kx aumentos en el microscopio electrónico de barrido (SEM) marca TESCAN modelo MIRA 3 FEG – SEM y por medio del detector de rayos X marca BRUKER para espectroscopia de difracción de rayos X (EDS) del laboratorio de Nanotecnología. Inicialmente se realizó un proceso de preparación de la muestra sobre pines metálicos; para esto se limpiaron los pines de muestra con diferentes paños o lijas finas que ayudaron a quitar los rastros de cinta de carbono usada para adherir otras muestras, después se colocó una nueva cinta de carbono en la cual añadieron las nanopartículas de muestra haciendo presión sobre la superficie del pin, posteriormente el pin de muestra se llevó a un proceso de limpieza con aire para eliminar partículas no adheridas a la superficie de observación, seguido de esto el pin de prueba se llevó a un recubrimiento con oro en el equipo de Sputtering en el cual se realizaron tres ciclos de recubrimiento de 15 segundos que garantizó la calidad de las micrografías. Este procedimiento de preparación de muestras se repitió para la observación de pintura P2 sin nanopartículas y con nanopartículas a diferentes valores de pH, concentración de nanomaterial y tiempo de ultrasonido.

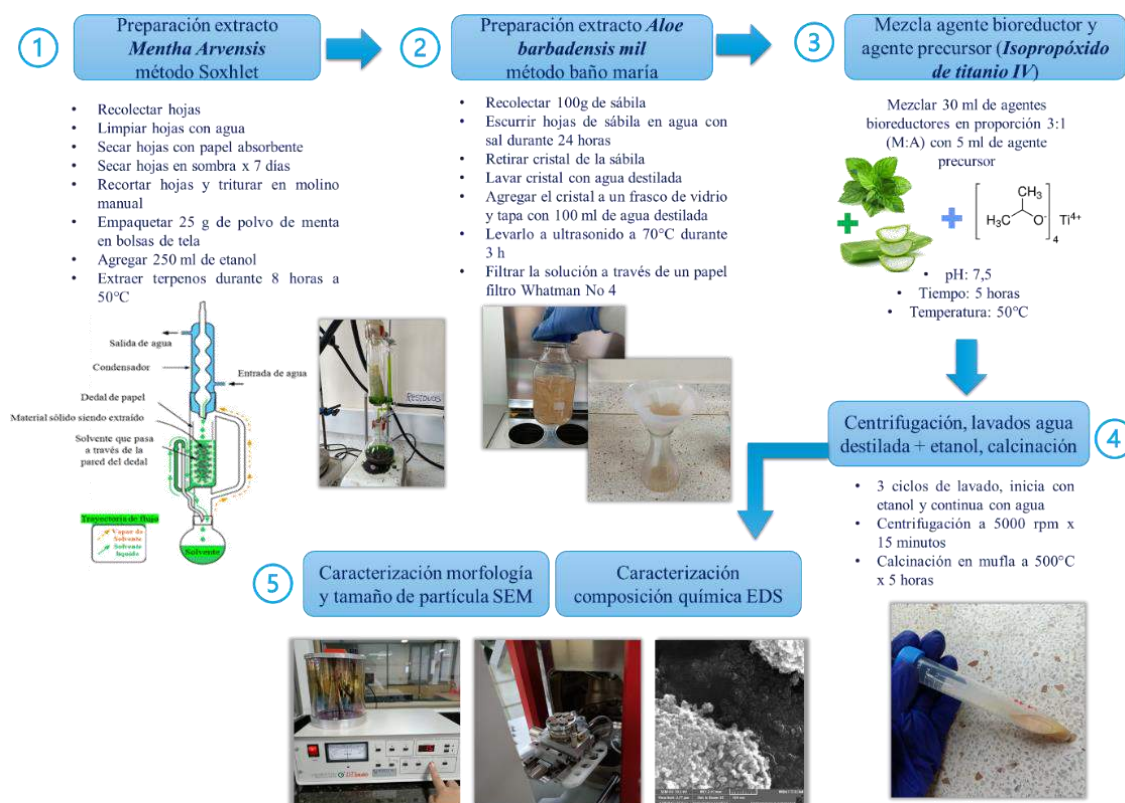


Fig. 25 Metodología síntesis por química verde y caracterización de nanopartículas

3) **Fase 3: Formulación de pinturas naturales variando el tipo de aglomerante:** Para la producción de pinturas naturales en base agua se adoptó la metodología desarrollada en el Manual Cores da Terra [45], la cual consta de fabricar pintura de tierra en dos etapas: la primera consiste en producir un pequeño volumen de pintura para conocer las características del pigmento, debido a que cada suelo presenta características fisicoquímicas y mecánicas variables, como viscosidad, tiempo de secado, grado de entizamiento, cuarteamiento aplicando un alto espesor, densidad, pH y conductividad; la segunda etapa consiste en elaborar un volumen de pintura mayor para evaluar su comportamiento antifúngico y mecánico ante procesos de deterioro.

Inicialmente se realizaron una serie de diseños de mezcla entre el pigmento mineral, pasta de cal y agua en diferentes volúmenes hasta obtener un valor de contenido de pigmento calculado del 25% que cumpliera una viscosidad medida en copa Ford No 4 entre 12 a 14 s (ajustada con KCl al 25% para obtener un pH = 8); posteriormente, a partir de esta concentración de pigmento se añadió un valor sugerido de 40% de aglomerante (sintético y natural) y 5% de aditivos previamente preparados (mucilago de nopal y dilución de sal en grano en agua 1:1) según indicaciones del manual de referencia; con este procedimiento se obtuvo un volumen final de

pintura de 1 litro, en la Fig. 26 se presenta una esquema del proceso de formulación de pinturas desarrollado.

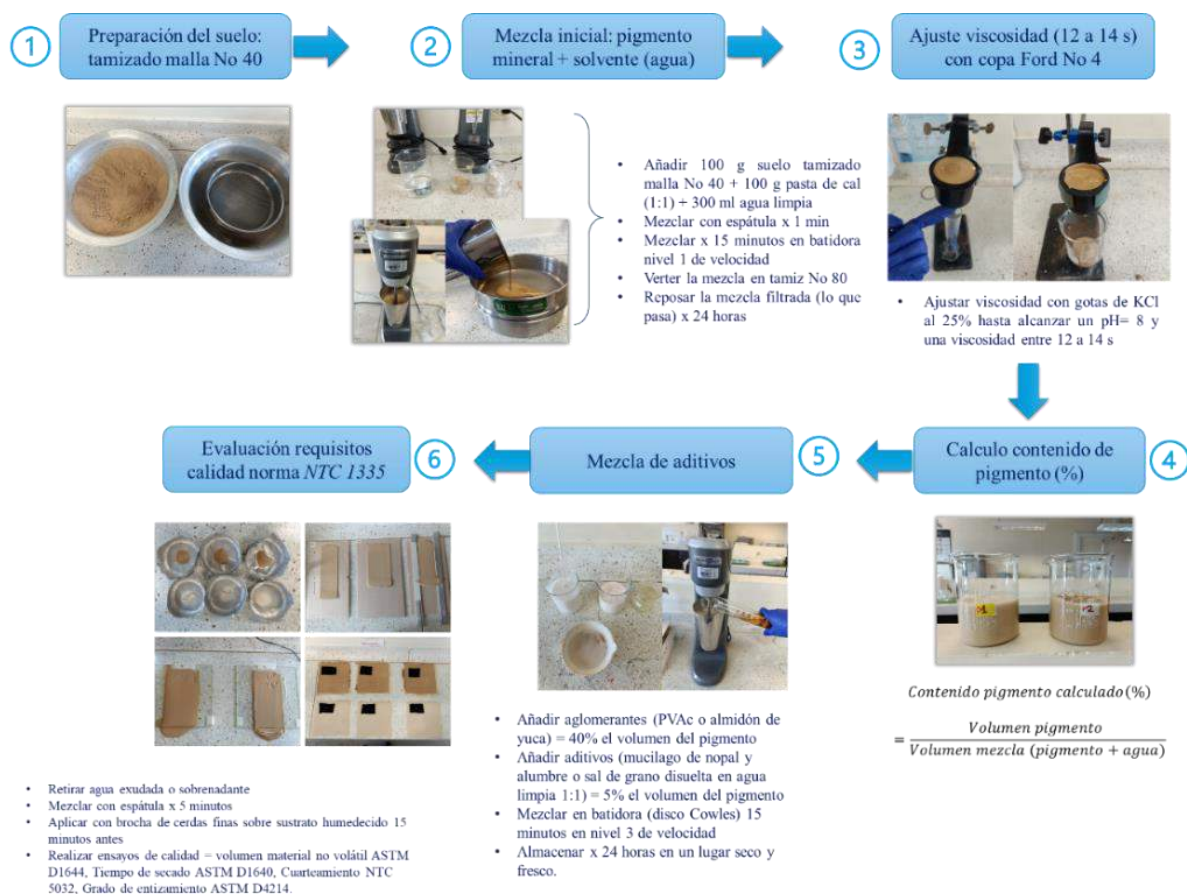


Fig. 26 Metodología formulación de pinturas naturales en base a pigmento mineral

TABLA VI
COMPOSICIÓN PINTURA NATURAL

Componente	Proporción (%v)	Cantidad
Pigmento mineral	25	250 g
Pasta de cal	25	250 g
Aglomerante (PVAc/Almidón de yuca)	40	100 ml
Mucilago de nopal	5	12,5 ml
Alumbre	5	12,5 ml
Volumen final		1000 ml

4) **Fase 4: Control de la calidad de las pinturas naturales P1 y P2 según requisitos NTC 1335:** La calidad de las pinturas naturales sin nanopartículas formuladas se evaluó por triplicado según los requisitos establecidos en la norma técnica NTC 1335 [69] que establece los ensayos que se presentan en la Tabla 7.

TABLA VII

ENSAYOS CONTROL DE CALIDAD DE PINTURAS NATURALES EN BASE AGUA

Ensayo	Referencia normativa
Determinación de la viscosidad de pinturas en copa Ford No 4	ASTM D1200 NTC 558 [76]
Determinación del volumen de material no volátil	ASTM D1644 [77] NTC 1227
Determinación del tiempo de secado, curado y formación de película	ASTM D1640 NTC 598 [78]
Determinación del cuarteamiento aplicando un alto espesor de pintura	NTC 5032 [79]
Determinación del grado de entizamiento	ASTM D4214 NTC 1457 [80]

B. Etapa 2: Evaluación antifúngica de la pintura natural con nano TiO₂ contra el ataque del hongo A. Níger:

En esta segunda etapa se evaluó el efecto antifúngico de las nanopartículas de TiO₂ aplicadas en la pintura con aglomerante natural (P2) ante la presencia del hongo *Aspergillus Níger* en medios de cultivo PDA durante 4 semanas, según el método de ensayo de resistencia al crecimiento fúngico ASTM D5590-17 [81]. Para esto, inicialmente se realizó un proceso de dispersión de nanopartículas en medio acuoso a través de ultrasonido variando las concentraciones del nanomaterial en porcentajes volumétricos de 0.1%, 0.3% y 0.5% y el tiempo de sonicación para suspenderlo en la mezcla de pintura por medio de agitación mecánica; posteriormente se preparó una suspensión de esporas del hongo en estudio a una concentración de 1×10^{-6} ml en una solución de sales nutritivas para adicionarla sobre medios de cultivo de prueba con discos de papel filtro de 4,5 cm de diámetro previamente recubiertos de pintura e irradiados con luz UV durante un tiempo de 6 horas; finalmente, a los medios de cultivo de prueba, que se encontraban en incubación a $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa superior al 80%, se les realizó un registro fotográfico semanalmente durante un tiempo de 30 días por medio del cual se analizó, en el software ImageJ, el porcentaje de cobertura de la superficie expuesta con recubrimiento, sin y con nanopartículas de TiO₂, por las esporas del espécimen fúngico de prueba.

1) *Fase 5: Dispersión de nano TiO₂ en pintura natural P2 por el método de cavitación ultrasónica:* Inicialmente se realizó la preparación de nanofluidos de nanopartículas de TiO₂ en agua destilada a una concentración de 1% el volumen de la pintura natural dispersas durante 30 minutos, para evaluar el efecto del pH de la pintura en la estabilidad del proceso de dispersión del nanomaterial; una vez establecido el valor de pH de la pintura con almidón de yuca (P2), se prepararon nueve (9) diferentes nanofluidos de TiO₂ en agua destilada variando la concentración del nanomaterial en valores de 0.1%, 0.3% y 0.5% y el tiempo de ultrasonido en valores de 10, 20 y 30 minutos según estudios de referencia [82], [83], [84], [85].

Las submuestras obtenidas de pintura P2 con nanomaterial se llevaron a microscopio electrónico de barrido (SEM) para analizar su morfología, ordenamiento y dispersión de partículas y composición química elemental a través de micrografías a 50 kx, 100 kx y 250 kx aumentos.

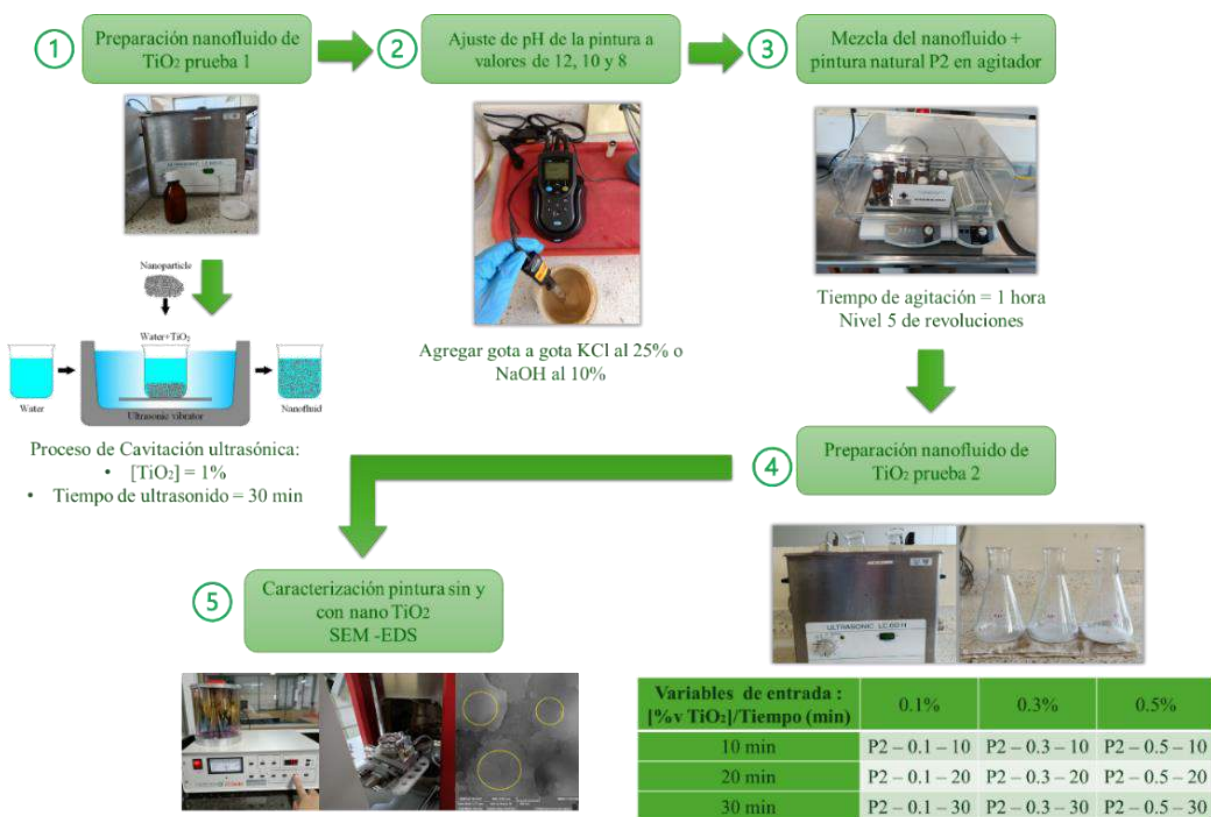


Fig. 27 Metodología formulación de pinturas naturales en base a pigmento mineral

2) **Fase 6: Crecimiento, aislamiento y suspensión de esporas fúngicas:** Inicialmente se colocó granos de frijol rojo durante 15 días en solución de vinagre y agua 1:1 dentro de una cámara húmeda casera; posteriormente las muestras se trasladaron al laboratorio de microbiología para incubarlas en medios de cultivo de agar de dextrosa PDA previamente preparadas y esterilizadas en autoclave a 121°C y 15 libras de presión durante 15 minutos, las muestra biológica se colocó en los medios de cultivo usando la técnica de punción con asa recta; después de un tiempo de 72 horas en incubación a 28°C ± 2°C y humedad superior al 80%, se realizó una observación inicial macro y microscópicamente para corroborar el tipo de especies fúngicas que estaban creciendo en el medio de cultivo a través de características como la forma de las esporas, cabeza conidial, presencia de conidióforos y micelios.

Después de 7 días de incubación se realizó una segunda observación macro y microscópica de las colonias desarrolladas y se inició con el proceso de aislamiento de la especie *Aspergillus Níger* a través del uso de réplicas de colonias en medio de cultivo PDA.

Posteriormente se preparó una solución de sales nutritivas, según las indicaciones del método de ensayo ASTM D5590-17[81], para suspender las esporas del hongo aislado hasta alcanzar una solución de esporas de 1×10^{-6} ml. La solución obtenida se reservó hasta aplicarla sobre los discos de prueba de la evaluación antifúngica.

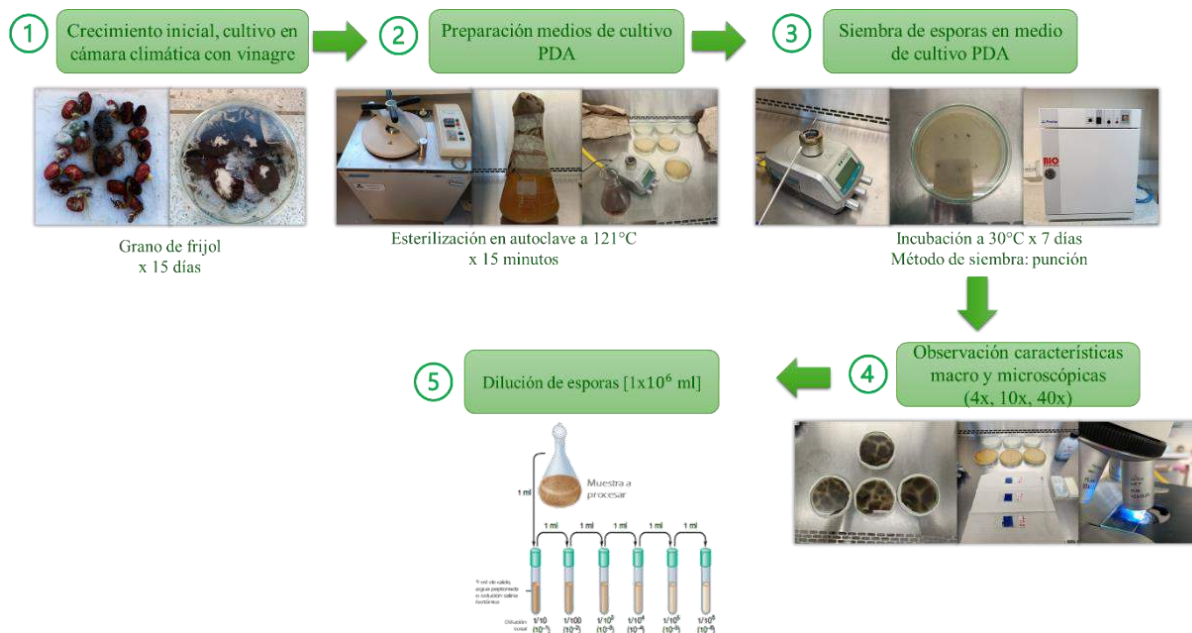


Fig. 28 Metodología crecimiento, aislamiento y suspensión de esporas fúngicas

3) *Fase 7: Evaluación antifúngica de la pintura natural P2 con nano TiO₂, método de ensayo ASTM D5590-17*: Inicialmente se prepararon los discos de prueba para aplicar las nueve muestras de pintura P2 con nanopartículas de TiO₂ y una muestra de control sin pintura y con pintura sin nanopartículas, para esto se recortaron círculos de 4,5 cm de diámetro de varias hojas de papel filtro Whatman No 4 y se esterilizaron en autoclave a 121°C y 15 libras de presión durante 15 minutos; posteriormente, a los discos limpios, secos y pesados en balanza, se les aplicó una primera capa de pintura con pincel de cerdas finas y se dejó secar durante 4 horas en cabina de seguridad esterilizada, después de este tiempo de secado se pesó nuevamente el disco y se repitió el proceso de pintado y secado, como se muestra en la Fig. 29. Después de 8 horas de secado, el proceso se repitió en la segunda cara del disco de prueba y de esta manera se obtuvo un disco con un peso final de 0,4 g.

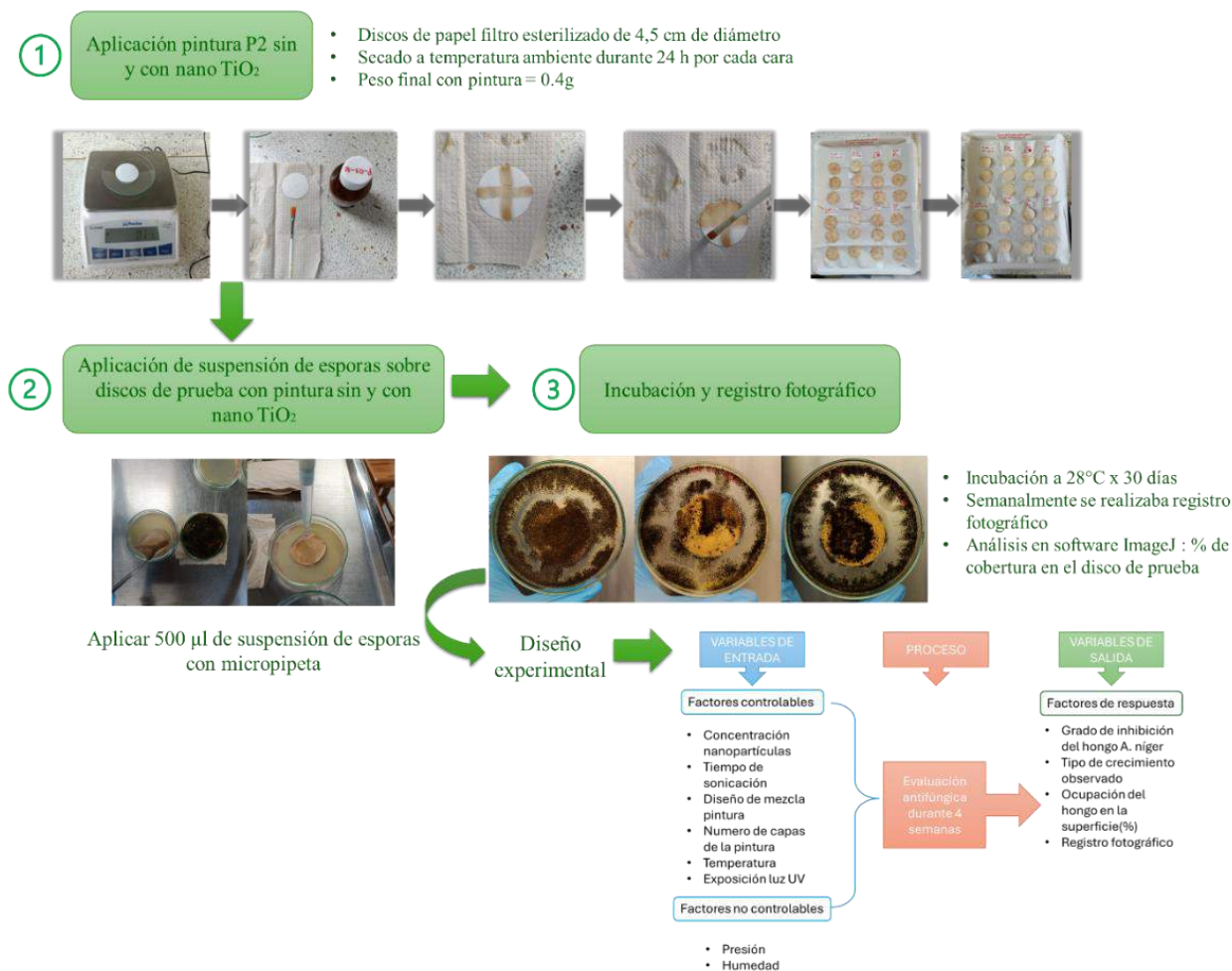


Fig. 29 Metodología evaluación antifúngica pintura natural con nano TiO₂

Una vez preparados los discos de prueba sin pintura (SP), con pintura sin nanopartículas (PSN) y con pintura con nanopartículas (PCN), los especímenes se irradiaron con luz UV para activar el proceso de fotocatalisis durante un tiempo de 6 horas [86]. Posteriormente se añadió a la superficie del medio de cultivo y del recubrimiento 500 μ l de suspensión de esporas en sales nutritivas y se llevaron los medios de cultivo de prueba sellados con cinta a incubar durante 30 días a una temperatura de $28^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa superior al 80%, a los 3 días de crecimiento se realizó una observación macroscópica de las colonias que se estaban desarrollando y a en los primeros 7 días de incubación la observación macroscópica se acompañó con una identificación microscópica del hongo presente; adicionalmente a las observaciones de las colonias se realizó un registro fotográfico semanalmente durante 4 semanas (30 días) de exposición al hongo para analizar en el software ImageJ el porcentaje de cobertura superficial en el disco de prueba del espécimen fúngico en estudio teniendo en cuenta recomendaciones de trabajos previos [81], [86], [87], [88].

C. Etapa 3: Determinación de la resistencia mecánica y durabilidad de la pintura natural con nano TiO_2 aplicada en BTC

En esta tercera etapa, se determinó la resistencia mecánica de la pintura natural P2 sin y con nanopartículas de TiO_2 al aplicarlas con brocha sobre Bloques de Tierra Comprimida (BTC) expuestos a ensayos de erosión húmeda y abrasión según el protocolo de ensayos para elementos constructivos en tierra de la Red Protierra [89] con los cuales se emulan algunos de los factores ambientales causantes de deterioro físico y disminución en la durabilidad de las construcciones en tierra. Inicialmente se desarrolló el proceso de caracterización del suelo y fabricación de los bloques de prueba por medio de ensayos fisicoquímicos y mecánicos in – situ y en laboratorio, y el uso de la prensa CINVA – RAM. Posteriormente, se preparó el sustrato curado durante 30 días para aplicar con brocha una muestra de pintura natural P2 sin y con nanopartículas de TiO_2 , y se iniciaron las pruebas de resistencia mencionadas.

1) *Fase 8: Caracterización de propiedades fisicoquímicas y mecánicas del suelo para fabricación de Bloques de Tierra comprimida:* La caracterización del suelo para fabricar Bloques de Tierra Comprimida se realizó a través de los ensayos in – situ (vernáculos) tales como la textura, humedad, color, brillo, resistencia seca, olor y compresión [90], los resultados de estos ensayos semicuantitativos se complementaron con pruebas de laboratorio como se muestra en la Tabla 8; se prepararon 40 kg de suelo extraído del campus a través de un proceso de remoción de material vegetal y plástico, secado, trituración de terrones y tamizado por malla de 5 mm de abertura.

TABLA VIII
PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN DEL SUELO PARA BTC

Ensayo	Referencia normativa
Tamaño de partículas del suelo	NTC 6299 – 2018 [72]
Limite líquido, plástico e índice de plasticidad	ASTM D4318 [73]
Ensayo normal de compactación	ASTM D698 [91]
Test tamaño de partículas	
Test del color	
Test del brillo o ensayo de corte	
Test del tacto	
Test del olor	
Test de lavado de manos	
Test caída de bola	Protocolo de ensayos de
Test de textura en frasco	campo para la identificación de
Test del cordón o consistencia	suelos [90]
Test de la cinta o cohesión	
Test de exudación	
Test de resistencia seca	
Test del rollo	
Test de compresión	



Fig. 30 Metodología caracterización suelo para BTC

Posteriormente, se fabricaron bloques macizos de suelo comprimido en prensa CINVA - RAM del laboratorio de construcciones con dimensiones de 30 cm de largo x 15 cm de ancho x 12 cm de espesor como se muestra en la Fig. 31. El proceso de fabricación consistió en la preparación del suelo seleccionado con agua hasta alcanzar la humedad óptima de compresión, verificada por medio de una prueba de humedad in – situ, para agregarlo al molde de la prensa y por medio de la presión mecánica de la palanca obtener una cantidad aproximada de 40 bloques que se llevaron a curado durante 30 días en superficie plana, limpia, lisa, protegida del sol, la lluvia y los vientos fuertes. Posteriormente, la aplicación de la pintura SNP y CNP sobre los bloques de prueba se realizó con brocha de cerdas finas en la cara superior del bloque previamente limpia y humedecida (15 minutos antes).

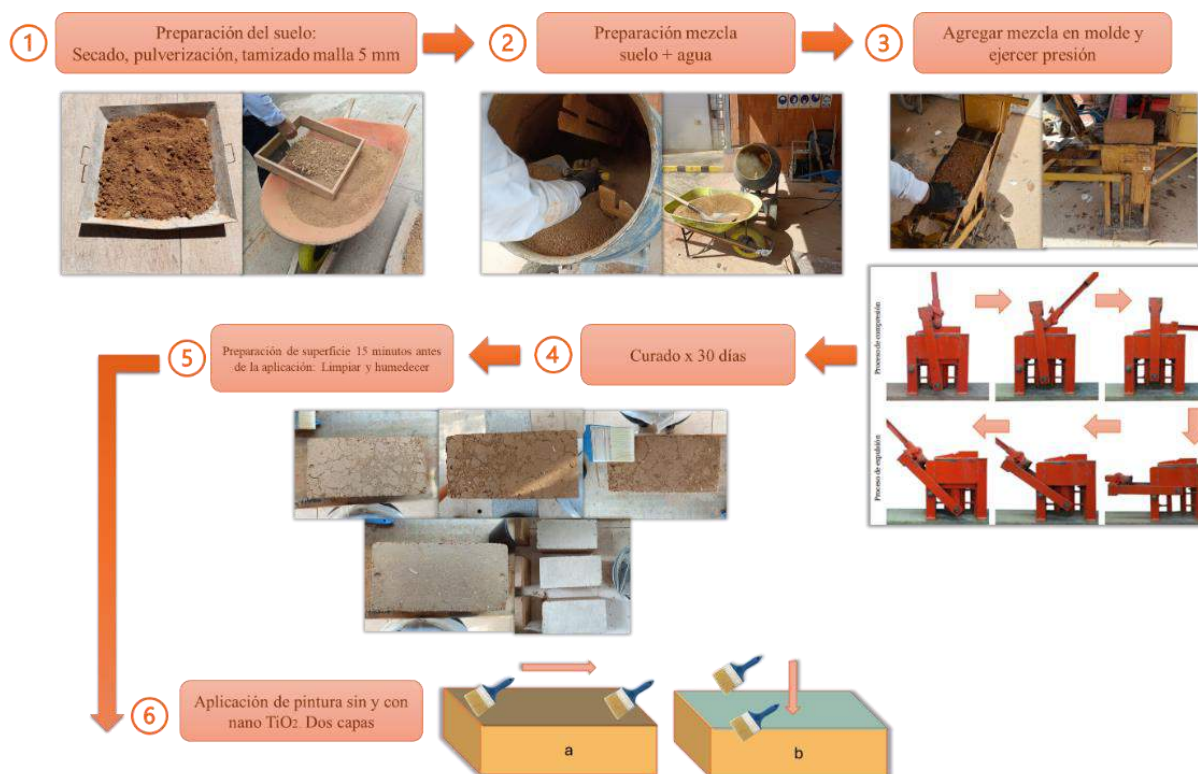


Fig. 31 Metodología fabricación de BTC y aplicación de pintura natural con nano TiO_2

2) **Fase 9: Evaluación de la resistencia mecánica de la pintura natural con nano TiO_2 sobre BTC:** La resistencia a la erosión húmeda se determinó a partir del método de ensayo Geelong del protocolo PROTierra [89], por medio del cual se expone la cara del bloque recubierto a una caída de 100 ml de agua en forma de goteo durante 20 a 60 minutos en un plano inclinado de 30°C ; el nivel de resistencia se calculó de acuerdo con la profundidad del orificio generado por la erosión de las gotas de agua, este valor se midió con una varilla de punta plana de 3,5 mm de diámetro como se muestra en la Fig. 32.

Por otra parte, la resistencia a la abrasión se determinó a través del cálculo del coeficiente de abrasión del material de recubrimiento, para esto utilizo un cepillo de cerdas metálicas de 3 kg con el cual se generó un desgaste por fricción con movimientos paralelos a la dimensión más larga de la superficie durante 60 ciclos (ida y vuelta) en un tiempo de 1 minuto, como se observa en la Fig. 32.

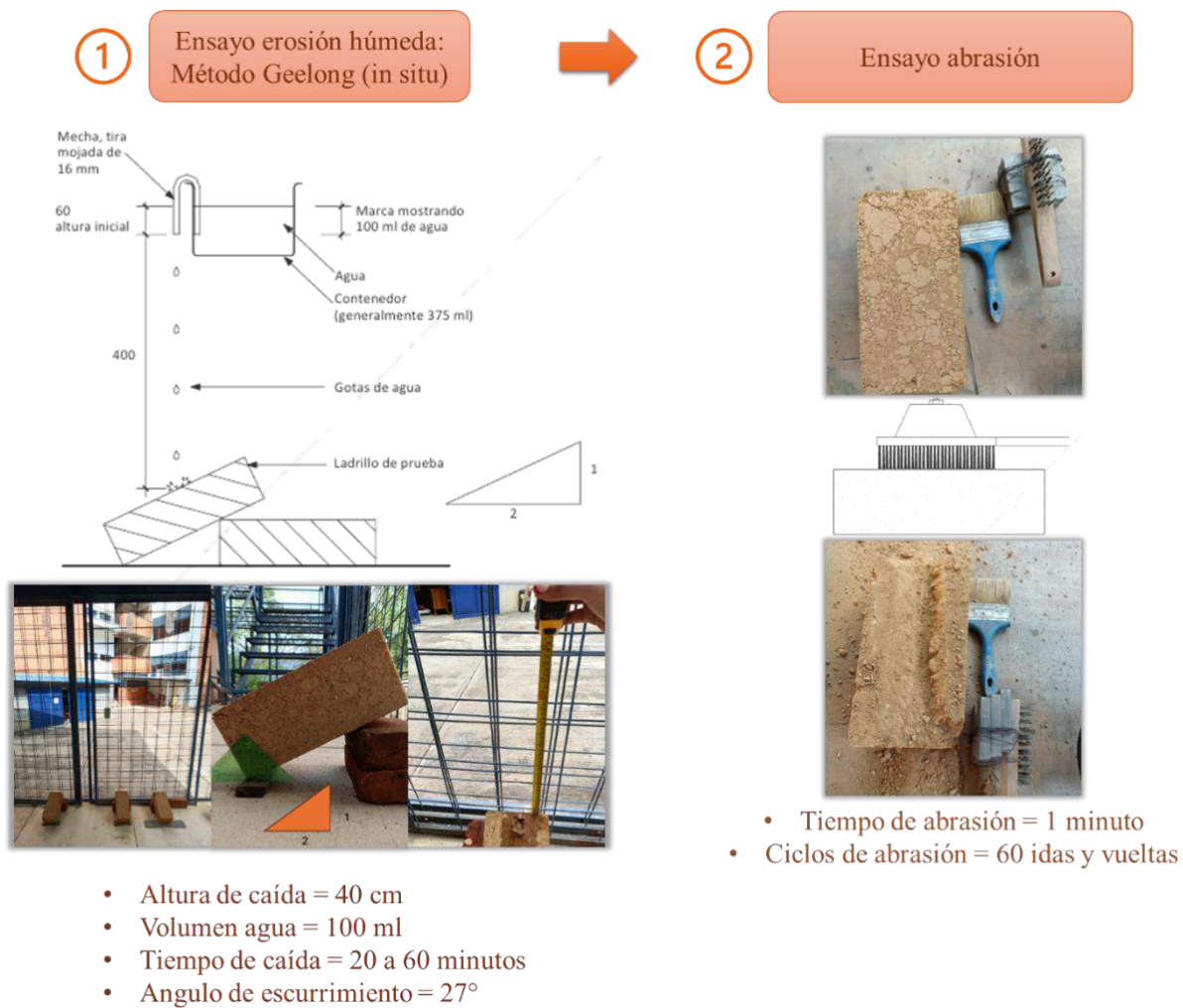


Fig. 32 Metodología fabricación de BTC y aplicación de pintura natural con nano TiO_2

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan y discuten los resultados obtenidos de cada una de las etapas del estudio.

A. Etapa 1: Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los componentes de la pintura natural con nano TiO_2

- Tamaño de partículas y textura del pigmento mineral:

Al determinar el tamaño de partículas por el método de tamizado se obtuvieron los resultados de la Tabla 9.

TABLA IX
RESULTADOS ENSAYO TAMAÑO DE PARTÍCULAS DEL PIGMENTO MINERAL,
MÉTODO TAMIZADO

Parámetro		Valor				
Peso inicial (g)		802.20				
Peso después de lavado (g)		241.50				
Peso perdido (g)		560.70				

Abertura de malla		Peso retenido (g)	Peso retenido corregido (g)	Peso retenido parcial (%)	Peso retenido acumulado (%)	Peso pasa (%)
Pulgadas	mm					
3	75.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2	50.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1 ½	37.50	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
¾	19.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
No 4	4.75	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
No 10	2.00	3.40	3.40	0.42	0.42	99.58
No 20	0.85	17.80	17.80	2.22	2.64	97.36
No 40	0.425	47.10	47.10	5.87	8.52	91.48
No 60	0.250	48.10	48.10	6.00	14.51	85.49
No 140	0.160	102.10	102.10	12.73	27.24	72.76
No 200	0.075	18.80	18.80	2.34	29.59	70.41
Fondo		4.00	560.70 = 564.70		70.41	100
Total		241.30	802.00		100	

El proceso de tamizado presento un porcentaje de error de 0.0828%, como es un valor inferior al 1% el procedimiento y los resultados reportados son confiables.

$$\% \text{ error} = \left(\frac{\text{peso despues de lavado (g)} - \text{peso retenido total(g)}}{\text{peso despues de lavado (g)}} \right) * 100$$

Ecuación (6)

$$\% \text{ error} = \left(\frac{241.50 - 241.30}{241.50} \right) * 100 = 0.0828\%$$

A partir de los resultados anteriores, se determinó el contenido de grava, arena y partículas finas con ecuaciones del sistema unificado de clasificación del suelo (SUCS). El pigmento mineral presento 0% de gravas, 29.59% de arenas y 70.41% de material fino, por lo tanto se puede clasificar como un suelo fino debido a que más del 50% de sus partículas pasan por el tamiz No 200.

$$\% \text{ Grava} = 100 - \% \text{ pasa tamiz No 4}$$

Ecuación (7)

$$\% \text{ Grava} = 100 - 100 = 0$$

$$\% \text{ finos} = \% \text{ pasa tamiz No 200}$$

Ecuación (8)

$$\% \text{ finos} = 70.41\%$$

$$\% \text{ arena} = 100 - (\% \text{ grava} + \% \text{ finos})$$

Ecuación (9)

$$\% \text{ arena} = 100 - (0 + 70.41) = 29.59\%$$

Con los resultados obtenidos se grafica la curva de distribución de tamaños que se muestra en la Fig. 33. De la gráfica se puede observar que los diámetros efectivos que corresponden al 10, 30 y 60% de partículas que pasan en dicho diámetro no pueden ser calculados y el suelo en estudio requiere de la determinación de la carta de plasticidad a través de los límites de humedad.

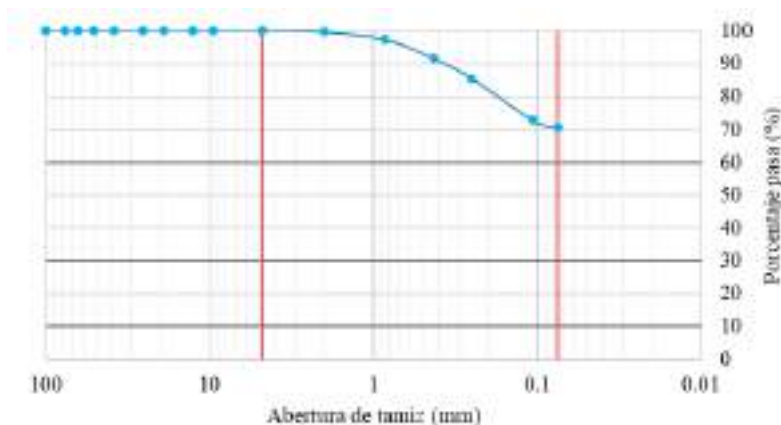


Fig. 33 Curva distribución de tamaños del pigmento mineral

Del ensayo granulométrico por el método de Bouyoucos, se obtuvieron los valores de la Tabla 10. con los cuales se determinó el porcentaje de arena, arcilla y limo del suelo usado como pigmento mineral usando las siguientes ecuaciones.

TABLA X
RESULTADOS ENSAYO TEXTURA DEL PIGMENTO MINERAL, MÉTODO DE
BOUYOCOS

No muestra	Lectura 1 (40 s) g/l	Temperatura °C	Factor de corrección	Lectura 1 (40 s) corregida g/l
1	29.00	24.00	1.64	30.64
2	29.00	24.50	1.82	30.82
3	29.00	25.00	2.00	31.00
Promedio				30.82
No muestra	Lectura 2 (2 h) g/l	Temperatura °C	Factor de corrección	Lectura 2 (2 h) corregida g/l
1	19.00	24.00	1.64	20.64
2	19.00	24.00	1.64	20.64
3	19.00	24.00	1.64	21.64
Promedio				20.97

$$\text{Factor de corrección} = (T^{\circ}\text{C} \times 0.36) - 7 \quad \text{Ecuación (10)}$$

$$\% \text{ Arena} = 100 - \left(\frac{\text{Lectura 1 corregida}}{\text{Peso muestra (g)}} \times 100 \right) \quad \text{Ecuación (11)}$$

$$\% \text{ Arena} = 100 - \left(\frac{30.64}{50} \times 100 \right) = 38.72\%$$

$$\% \text{ Arcilla} = 100 - \left(\frac{\text{Lectura 2 corregida}}{\text{Peso muestra (g)}} \times 100 \right) \quad \text{Ecuación (12)}$$

$$\% \text{ Arcilla} = 100 - \left(\frac{20.64}{50} \times 100 \right) = 58.72\%$$

$$\% \text{ Limo} = 100 - (\% \text{ Arena} + \% \text{ Arcilla}) \quad \text{Ecuación (13)}$$

$$\% \text{ Limo} = 100 - (38.72 + 58.72) = 2.56\%$$

Al graficar el contenido de partículas de arena, arcilla y limo de la Tabla 11. en el diagrama textural de los suelos de la Fig. 34, se puede observar que el suelo en estudio se clasifica como un suelo arcilloso con 58.5% partículas de arena, 3.59% partículas de limo y 38.36% partículas de

arcilla en promedio; las características principales de la pintura y su calidad dependerán de coloides de arcilla.

TABLA XI
CONTENIDO DE PARTÍCULAS DE ARENA, LIMO Y ARCILLA EN EL PIGMENTO MINERAL

No muestra	Contenido de arena (%)	Contenido de arcilla (%)	Contenido de limo (%)
1	58.72	38.72	2.56
2	58.72	38.36	2.96
3	58.72	38.00	5.28
Promedio	58.05	38.36	3.59

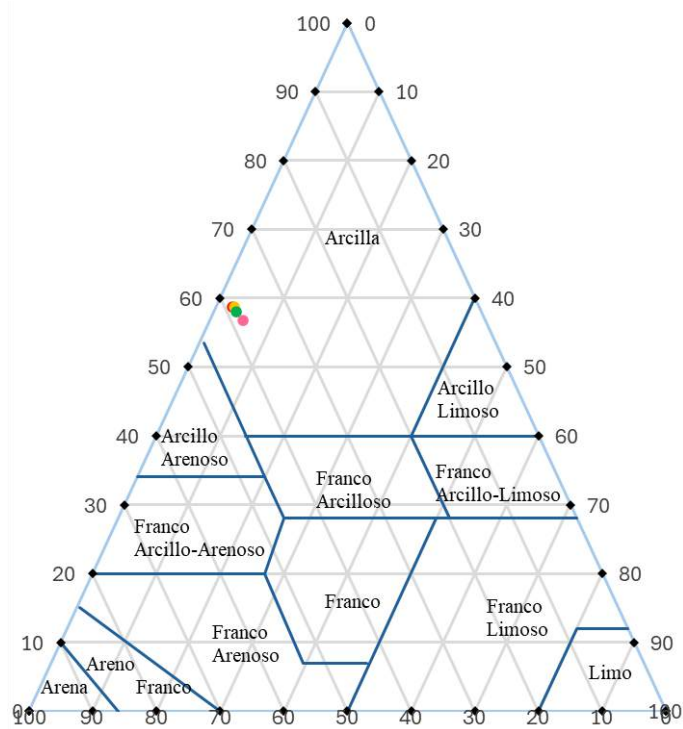


Fig. 34 Triángulo textural suelo pigmento mineral

- Humedad gravimétrica y límites de Atterberg:

A partir de la determinación de la porción de agua por cada unidad de pigmento mineral seco, la muestra de suelo en estudio presenta un contenido de humedad gravimétrica del 24%; según la literatura este valor se encuentra dentro del rango de 15 a 35% representativo de suelos areno arcillosos o arcillo arenoso con alta retención de agua y plasticidad, baja capacidad de infiltración y drenaje lento [92].

$$HG(\%) = \left(\frac{\text{Peso muestra húmeda} - \text{Peso muestra seca}}{\text{Peso muestra seca}} \right) \times 100$$

Ecuación (14)

$$HG(\%) = \frac{10.10 - 8.10}{8.10} \times 100 = 24.69\%$$

TABLA XII**RESULTADOS ENSAYO HUMEDAD GRAVIMÉTRICA DEL PIGMENTO MINERAL**

No muestra	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)	Humedad gravimétrica (%)
1	10.10	8.10	24.69
2	10.10	8.10	24.69
3	10.10	8.10	23.46
Promedio			24.28

El valor de limite liquido se calculó a partir de la siguiente ecuación. Los valores obtenidos se graficaron en una curva de contenido de humedad vs número de golpes en las ordenadas a escala aritmética y en las abscisas a escala logarítmica respectivamente; la línea de tendencia de la gráfica permite obtener una ecuación representativa de la cual el valor de limite liquido obtenido (a los 25 golpes) es de 44% aproximadamente.

$$\text{Contenido de humedad}(\%) = \frac{\text{Peso del agua (g)}}{\text{Peso del suelo seco (g)}} \times 100$$

Ecuación (15)

$$\text{Contenido de agua}(\%) = \frac{3.4}{8.51} \times 100 = 42.773\% = 43\%$$

TABLA XIII**RESULTADOS ENSAYO LÍMITE LIQUIDO DEL PIGMENTO MINERAL**

No capsula	No de golpes	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)	Peso del agua (g)	Contenido de humedad (%)
14	34	12.15	8.51	3.64	42.77
60	24	10.45	7.21	3.24	44.94
47	17	12.35	8.46	3.89	45.98

$$\text{límite liquido (LL)} = -4.631 \ln(x) + 59.286; x = 25 \text{ golpes}$$

$$\text{límite liquido (LL)} = -4.631 \ln(25) + 59.286 = 44.37938 = 44\%$$

Ecuación (16)

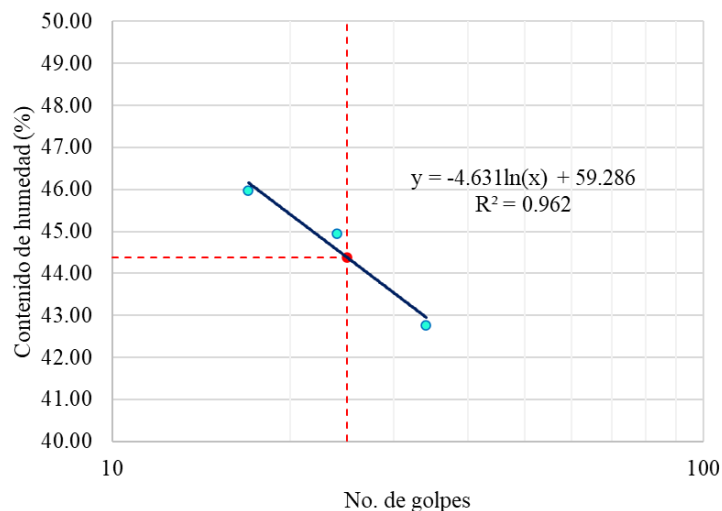


Fig. 35 Curva Límite líquido del pigmento mineral

El valor límite plástico se determinó a través de la siguiente ecuación. Los resultados obtenidos muestran un valor promedio del 14% con el cual se define un valor de Índice de plasticidad de 30%, este último resultado muestra el margen de humedades del pigmento mineral en el cual el material se encuentra en estado plástico.

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{\text{Peso del agua (g)}}{\text{Peso del suelo seco (g)}} \times 100 \quad \text{Ecuación (17)}$$

$$\text{Índice de plasticidad} = \text{Límite Líquido} - \text{Límite Plástico}$$

$$\text{Ecuación (18)}$$

$$\text{Índice de plasticidad} = 44 - 14 = 30\%$$

TABLA XIV
RESULTADOS LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DEL PIGMENTO MINERAL

No capsula	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)	Peso del agua	Contenido de humedad (%)
32	11.45	10.06	1.39	13.82
24	11.92	10.47	1.45	13.85
Promedio				13.82

Al comparar los resultados obtenidos con la literatura, se observa que el límite líquido se encuentra en un rango de 40 a 60%, el límite plástico en un rango de 5 a 30% y el índice de plasticidad en un rango de 20 a 40% característicos de suelos arcillosos de alta plasticidad.

TABLA XV
GRADO DE PLASTICIDAD DEL PIGMENTO MINERAL A PARTIR DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD [92]

Grado de plasticidad	IP (%)
No presenta	0
Ligera	1 – 5
Baja	5 – 10
Media	10 – 20
Alta	20 – 40
Muy alta	>40

Con los valores de los límites de humedad obtenidos se logró graficar el comportamiento de la plasticidad del pigmento para clasificar el suelo según la carta de plasticidad de Casagrande que se muestra en la Fig. 36; teniendo en cuenta el índice de plasticidad vs el límite líquido, el suelo en estudio se clasifica como una arcilla de baja plasticidad o compresibilidad (CL).

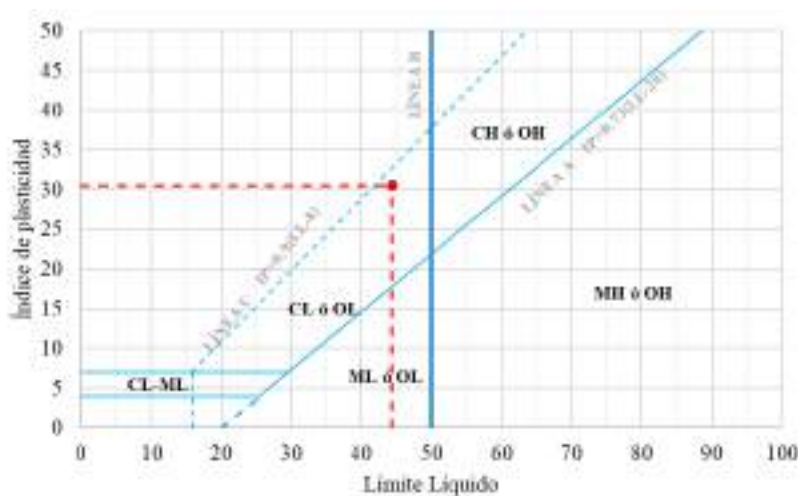


Fig. 36 Carta de plasticidad de Casagrande para pigmento mineral

Según el método AASHTO de clasificación de suelo, el material en estudio presenta características de suelo A-7-6 principalmente por ser altamente elástico y sujeto a grandes cambios volumétricos que se reflejan en el aumento proporcional de los valores de límite líquido e índice de plasticidad y en la disminución del porcentaje de partículas gruesas.

Por otra parte, del contenido de humedad en el cual el suelo presenta un comportamiento semisólido, se obtuvo un valor de Límite de contracción promedio de 12.08%, relación de contracción de 1.90, grado de contracción de 36.96% y compresibilidad de 0.306 lo cual es característico de un suelo con actividad de contracción y expansión significativa que aumenta la aparición de grietas o micro fisuras.

$$\text{Limite de contracción (LC)} = w - \left(\frac{(V - V_o) \times \rho_w}{M_o} * 100 \right) \quad \text{Ecuación (19)}$$

$$\text{Limite de contracción (LC)} = 43.03 - \left(\frac{(20.61 - 13.07) \times 1}{24.82} * 100 \right) = 12.65$$

$$\text{Relacion de contraccion (R)} = \frac{M_o}{V_o \times \rho_w} \quad \text{Ecuación (20)}$$

$$\text{Relacion de contraccion (R)} = \frac{24.25}{12.83 \times 1} = 1.90$$

$$\text{Grado de contraccion (GC)} = \frac{V - V_o}{V} \times 100 \quad \text{Ecuación (21)}$$

$$\text{Grado de contraccion (GC)} = \frac{20.61 - 13.07}{20.61} \times 100 = 36.59$$

$$\text{Compresibilidad (C}_c\text{)} = 0.009 \times (LL - 10) \quad \text{Ecuación (22)}$$

$$\text{Compresibilidad (C}_c\text{)} = 0.009 \times (44 - 10) = 0.306$$

TABLA XVI
RESULTADOS LÍMITE DE CONTRACCIÓN DEL PIGMENTO MINERAL

No capsula	M (g)	Mo (g)	W (%)	V (cm3)	Vo (cm3)	LC
32	32.50	24.82	43.03	20.61	13.07	12.65
8	33.91	23.68	43.20	20.10	12.60	11.51
Promedio						12.08

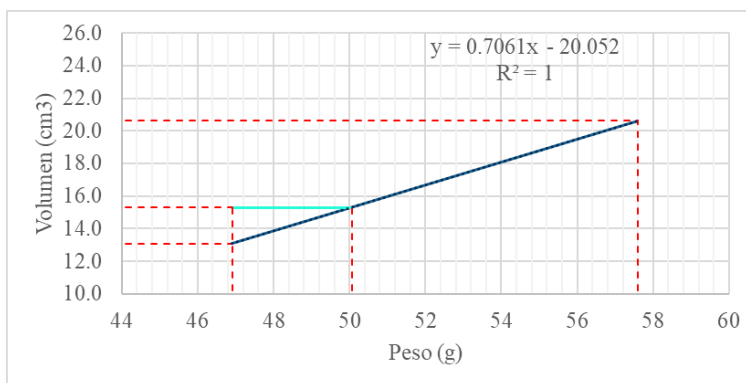


Fig. 37 Curva Límite de contracción del pigmento mineral

- Densidad real:

La densidad de las partículas sólidas del pigmento mineral presento un valor promedio de 1.32 g/cm³; comparando el resultado obtenido con la literatura [92] el valor se encuentra en un rango de 1.0 a 1.5 g/cm³ característico de suelos arcilloso, también se puede indicar con este valor la posible presencia de alto contenido de minerales aluminosilicatos no cristalinos.

$$D_{real}\left(\frac{g}{mL}\right) = \frac{\text{peso de la muestra (g)}}{\text{Volumen desplazado (mL)}}$$

Ecuación (23)

$$D_{real}\left(\frac{g}{mL}\right) = \frac{20}{15} = 1.33$$

TABLA XVII

RESULTADOS ENSAYO DENSIDAD REAL DEL PIGMENTO MINERAL

No muestra	Peso suelo seco (g)	Volumen desplazado (ml)	Densidad real (g/ml)
1	20.00	15.00	1.33
2	20.00	15.00	1.29
3	20.00	15.00	1.33
Promedio			1.32

- pH y conductividad eléctrica:

A partir de las mediciones de pH por el método potenciómetro, se determinaron los resultados de la Tabla 18, los cuales muestran que el pigmento muestra un valor de pH en agua de 7.51 y un valor de pH en electrolito KCl de 6.32 en promedio. Estos valores representan un rango de pH entre ligeramente alcalino en agua y ligeramente ácido en el electrolito; también se puede considerar que el suelo presenta minerales como nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, calcio y

magnesio. El suelo en estudio se caracteriza como un intercambiador catiónico capaz de retener y absorber cationes en fase acuosa del mismo según el valor negativo de ΔpH .

TABLA XVIII
RESULTADOS ENSAYO PH DEL PIGMENTO MINERAL, MÉTODO
POTENCIÓMETRO

No muestra	Lectura en agua	Lectura en KCl	ΔpH
1	7.43	6.35	-1.08
2	7.53	6.33	-1.20
3	7.58	6.27	-1.31
Promedio	7.51	6.32	-1.20

$$\Delta pH = pH \text{ en KCl} - pH \text{ en agua}$$

$$\Delta pH = 6.35 - 7.43 = -1.08$$

Ecuación (24)

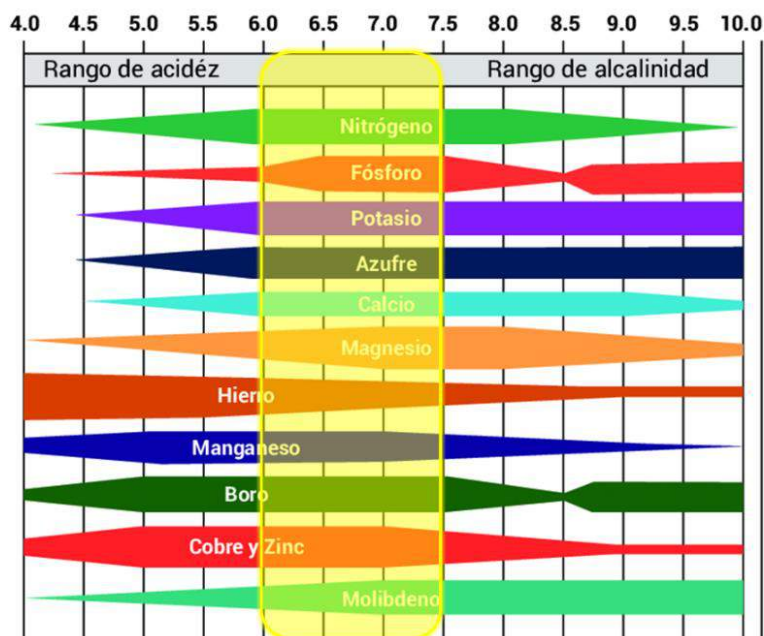


Fig. 38 Disponibilidad de minerales en el suelo según valores de pH

Por otra parte, la medida de la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica a partir de la cantidad de sales presentes medida por el método del conductímetro, presento un valor de $561 \mu S/cm$ equivalente a $0.561 dS/cm$ en promedio que representa un suelo con baja conductividad o no salino y por lo tanto una lenta retención de agua.

TABLA XIX
RESULTADOS ENSAYO CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL PIGMENTO
MINERAL, MÉTODO CONDUCTÍMETRO

No muestra	Lectura ($\mu\text{S/cm}$)	Lectura (dS/cm)
1	575	0.575
2	553	0.553
3	554	0.554
Promedio	561	0.561

- Síntesis y caracterización de nanopartículas de TiO_2

El proceso de síntesis por química verde y coprecipitación permitió obtener un total de 20 g de nanopartículas de TiO_2 en forma de polvo fino de color blanco. Al analizar el nanomaterial en el microscopio electrónico de barrido a 100 kx, 250 kx y 500 kx aumentos se observó un material con forma esférica definida pero aglomerado, de tamaño promedio entre 8.57 a 32.19 nm con desviaciones estándar entre 2.60 a 17.65 nm como se muestra en la Tabla 20. Comparando los resultados con la literatura [67] se evidencia que el nanomaterial presenta una adecuada distribución de tamaños en rango nanométrico con baja desviación de tamaños lo que indica baja variabilidad y mayor uniformidad, también se demuestra que las nanopartículas pueden tener una buena actividad antimicrobiana contra patógenos debido a que su rango de tamaño promedio es menor a 50 nm.

TABLA XX
RESULTADOS ESTADÍSTICOS DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE
NANOPARTÍCULAS DE TiO_2

Parámetro	Punto 1 a	Punto 2 a	Punto 1 a	Punto 2 a	Punto 1 a	Punto 2 a
	100 kx	100 kx	250 kx	250 kx	500 kx	500 kx
Media (nm)	32.19	29.08	19.13	21.31	8.57	9.64
Mediana (nm)	32.22	26.40	13.18	13.52	7.94	8.85
Desviación estándar (nm)	5.01	13.36	14.26	17.65	2.57	2.56
Rango (nm)	21.66	44.51	44.80	64.91	10.74	8.25
Valor mínimo (nm)	23.76	13.78	7.41	7.91	5.57	6.46
Valor máximo (nm)	45.42	58.29	52.21	72.82	16.31	14.71
No mediciones	20	20	20	20	20	20

Punto 1

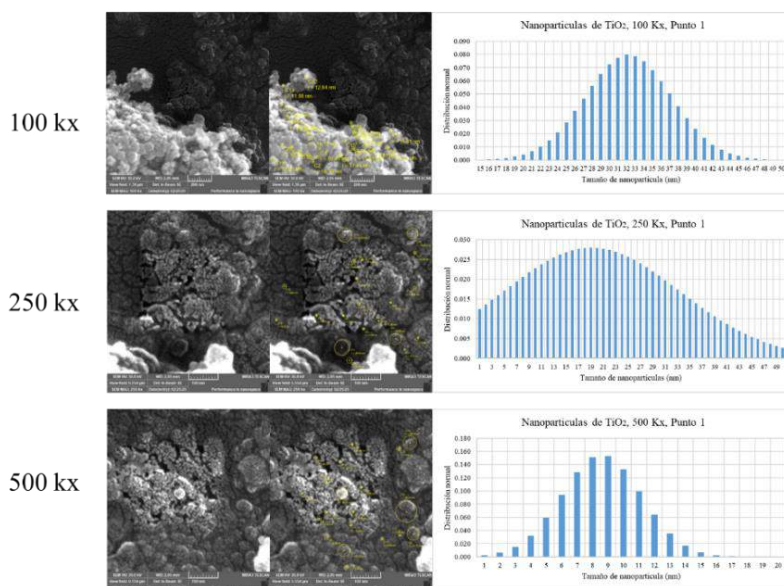


Fig. 39 Micrografías del nanomaterial a 100 kx, 250 kx y 500 kx aumentos con su distribución de tamaños en el punto 1

Punto 2

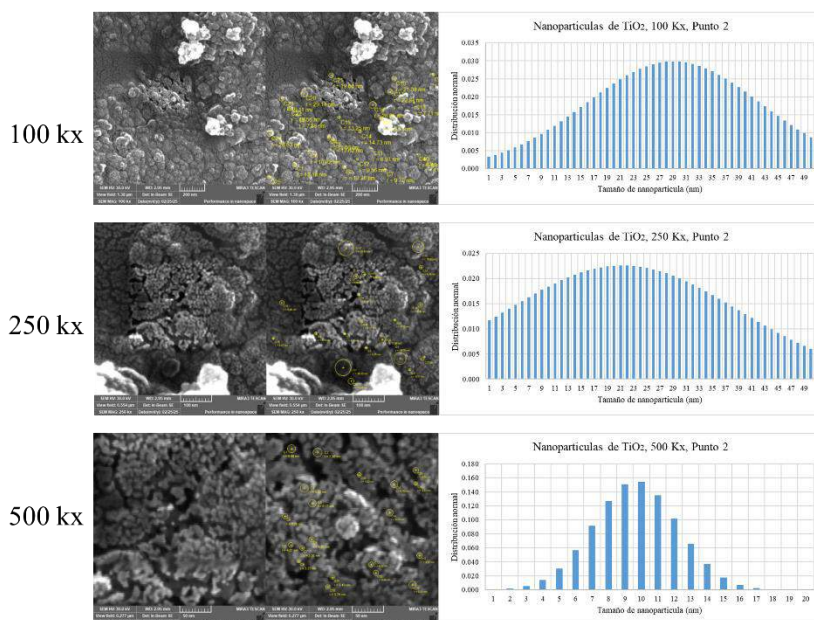


Fig. 40 Micrografías del nanomaterial a 100 kx, 250 kx y 500 kx aumentos con su distribución de tamaños en el punto 2

Del ensayo EDS, las muestras de nanomaterial analizadas a 50 kx y 100 kx presentaron un alto contenido de titanio (45.9%) y oxígeno (39.2%), seguido de carbono (7.6%), nitrógeno (6.9%)

y sodio (0.3%), con presencia de trazas de sílice (0.1%) y azufre (0.1%) como se muestra en la Tabla 21.

TABLA XXI
RESULTADOS COMPOSICIÓN QUÍMICA DE NANOPARTÍCULAS DE TiO₂

Elemento	% masa		Promedio
	50 kx aumento	100 kx aumento	
C	6.0	9.2	7.6
N	5.0	8.7	6.9
O	38.7	39.7	39.2
Na	0.3	0.2	0.3
Si	0.1	0.1	0.1
S	0.1	0.1	0.1
Ti	49.8	42.0	45.9

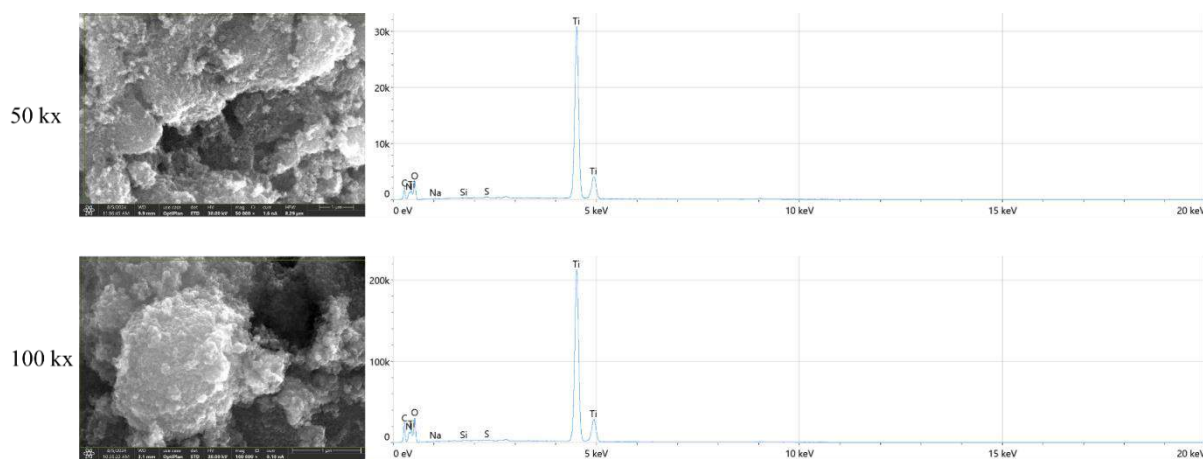


Fig. 41 Micrografías del nanomaterial a 50 kx y 100 kx ensayo EDS

- Formulación de pinturas naturales P1 y P2 y control de la calidad según requisitos NTC 1335

El valor del contenido de material no volátil de las pinturas P1 y P2 se determinó a partir de las siguientes ecuaciones. Como resultado se obtuvo un 24.5% de pigmento en la formulación de la pintura, con lo cual se estima, según la metodología adapta, un valor de aglomerante del 40% el volumen de pigmento y un rendimiento aproximado de la pintura de 4 m²/l.

$$\text{Volumen tamizado(ml)} = \text{volumen de mezcla que pasa malla No 80(ml)}$$

$$\text{Ecuación (25)}$$

Volumen tamizado = 1000 ml

Volumen de agua añadida para ajustar viscosidad = 20 ml

Volumen de agua inicial = 750 ml

Volumen de agua total = Volumen añadido + Volumen inicial

Ecuación (26)

Volumen de agua total = 750 + 20 = 770 ml

Volumen mezcla final (ml) = volumen tamizado + volumen agua añadida

Volumen mezcla final (ml) = 1000 ml + 20 ml = 1020 ml

Ecuación (27)

Volumen pigmento (ml) = Volumen mezcla final – Volumen de agua total

Volumen pigmento (ml) = 1020 – 770 = 250 ml

Ecuación (28)

Contenido de pigmento = $\frac{\text{Volumen pigmento (ml)}}{\text{Volumen mezcla final (ml)}} \times 100$

Ecuación (29)

Contenido de pigmento = $\frac{250 \text{ ml}}{1020 \text{ ml}} = 24,5098\%$

Al medir el pH de las pinturas P1 y P2 por el método del potenciómetro se obtuvo un resultado de 12.02 y 12.64 respectivamente para cada pintura. Se puede observar que la pintura con almidón de yuca tiene una mayor concentración de iones hidroxilo (OH⁻). Por otra parte, al medir la conductividad de las soluciones se puede observar de la Tabla 22 un bajo nivel de conductividad con valores de 0.0005 dS/cm para la pintura P1 y 0.0002 dS/cm para la pintura P2 en promedio.

TABLA XXII

RESULTADOS PH Y CONDUCTIVIDAD DE LA PINTURA NATURAL P1 Y P2

Tipo de pintura	No ensayo	pH en agua	Conductividad (dS/cm)
P1	1	12.02	0.000490
	2	12.02	0.000489
	3	12.02	0.000493
	Promedio	12.02	0.000491
P2	1	12.74	0.000163
	2	12.63	0.000163
	3	12.55	0.000168
	Promedio	12.64	0.000164

La determinación de la densidad de las pinturas P1 y P2 en picnómetro permitió determinar los resultados de la Tabla 23, en la cual se muestra que la densidad de las pinturas se encuentra entre el rango establecido por la norma europea EN – 1062 para pinturas en base agua que oscila entre 1.2 a 1.3 g/cm³, aunque la densidad de la pintura P2 es ligeramente mayor a la densidad de la pintura P1.

$$\text{Masa de pintura (g)} = (\text{masa picnometro} + \text{pintura}) - \text{masa picnometro} \quad \text{Ecuación (30)}$$

$$\text{Masa pintura (g)} = 29,9 - 18,3 = 11,6 \text{ g}$$

$$\text{Densidad de la pintura} = \frac{\text{masa pintura(g)}}{\text{volumen del picnometro (cm}^3\text{)}} \quad \text{Ecuación (31)}$$

$$\text{Densidad de la pintura} = \frac{11,600\text{g}}{9,958 \text{ cm}^3} = 1,165 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

TABLA XXIII
RESULTADOS DENSIDAD PINTURAS NATURALES P1 Y P2

Tipo de pintura	Masa picnómetro vacío (g)	Masa picnómetro con pintura (g)	Masa pintura (g)	Volumen picnómetro (cm³)	Densidad (g/cm³)
P1	18.30	29.90	11.60	9.958	1.17
P2	17.80	30.40	12.60	9.958	1.27

De los resultados obtenidos en la Tabla 24 se puede observar que la viscosidad inicial de las pinturas supera el rango requerido de tiempo de emanación para pinturas en base agua de 12 a 14 segundos; al hacer una comparación entre los tipos de pinturas se puede notar una diferencia significativa de 4 segundos aproximadamente, lo cual evidencia el efecto de la gelatinización del aglomerante en la formación de capas hidrofóbicas que encapsulan moléculas de agua y espesan la solución. Después del ajuste de la viscosidad, añadiendo gotas de KCl al 25%, se facilitó la aplicación de la pintura P2 sobre superficies sin marcas de brocha y logrando capas de espesor adecuado para disminuir la formación de fisuras o deformaciones.

TABLA XXIV
RESULTADOS VISCOSIDAD DE PINTURAS NATURALES P1 Y P2

Tipo de pintura	No ensayo	Tiempo de emanación inicial (s)	Tiempo de emanación final (s)
P1	1	15.00	12.00
	2	17.00	13.00
	3	15.00	13.00
	Promedio	15.67	12.67
	Desviación estándar	1.15	0.58
P2	1	20.00	12.00
	2	18.00	12.00
	3	20.00	12.00
	Promedio	19.33	12.00
	Desviación estándar	1.15	0

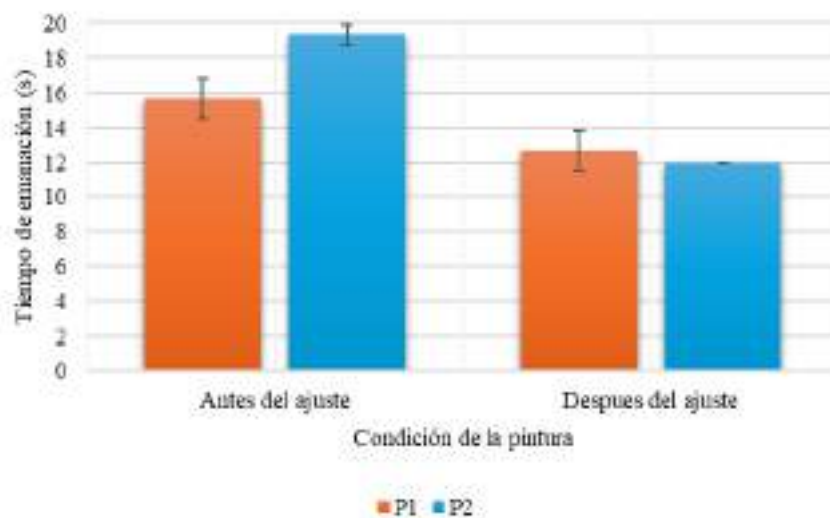


Fig. 42 Viscosidad de las pinturas naturales P1 y P2 antes y después de ajusta de pH

Por otra parte, el contenido de material no volátil (M), calculado a partir de la siguiente ecuación, mostro que en promedio la pintura P1 y la pintura P2 presentan un volumen de material no volátil de 36% y 33% respectivamente; realizando un análisis entre las dos pinturas naturales se aprecia que la pintura P1 retiene un 3% de material no volátil al momento de formar película seca en la superficie, esto significa según el requisito de la normatividad técnica que la pintura P1 cumple con el valor mínimo de material no volátil para pinturas Tipo 1 o de exterior (35%) pero la pintura P2 solo cumple con el requerimiento para pinturas Tipo 2 o de interior (32%).

$$M = \left(\frac{c - a}{b} \right) \times 100$$

$$M = \left(\frac{0.716 - 0.258}{1.260} \right) \times 100 = 36.349$$

Ecuación (32)

TABLA XXV
RESULTADOS CONTENIDO DE MATERIAL NO VOLÁTIL PARA PINTURAS
NATURALES P1 Y P2

Tipo de pintura	No muestra	Peso capsula (g)	Peso capsula + suelo húmedo (g)	Peso capsula + suelo seco (g)	Contenido material no volátil (%)
P1	1	0.258	1.260	0.716	36.349
	2	0.255	1.230	0.700	36.179
	3	0.257	1.202	0.694	36.356
	Promedio				36.295
	Desviación estándar				0.100
P2	1	0.252	1.387	0.719	33.670
	2	0.255	1.265	0.680	33.597
	3	0.218	1.300	0.655	33.615
	Promedio				33.627
	Desviación estándar				0.038

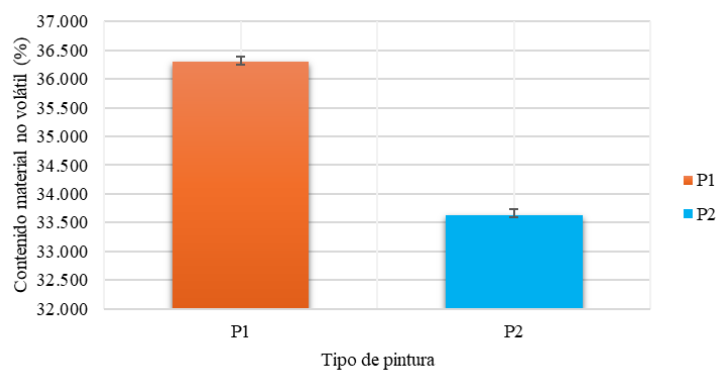


Fig. 43 Contenido material no volátil de las pinturas naturales P1 y P2.



Fig. 44 Resultado ensayo contenido material no volátil de las pinturas naturales P1 y P2.

De los resultados obtenidos en el ensayo de tiempos de secado, curado y formación de película seca se observó que en promedio las pinturas naturales se secaron al polvo en un tiempo de 3 horas, al tacto en un tiempo de 5 horas y al desprendimiento en un tiempo de 24 horas; la pintura P1 presento un menor tiempo de secado al polvo con una diferencia de 1 hora y media, sin embargo en el método de prueba B se aprecia solo una diferencia de tiempo de 48 minutos. Comparando los resultados con la referencia normativa, la pintura P1 y P2 no cumplen con el requisito de tiempo de secado máximo para repintado de 4 horas; sin embargo, al aplicar la pintura P2 en una superficie con mayor porosidad y rugosidad si se evidencio un tiempo de secado en 4 horas para repintar la superficie, por lo tanto se establece que cumple con el requisito para pinturas Tipo 1.

TABLA XXVI

RESULTADOS TIEMPO DE SECADO, CURADO Y FORMACIÓN DE PELÍCULA DE PINTURAS NATURALES P1 Y P2

Tipo de pintura	Método A (secado al polvo)		Método B (secado al tacto)		Método C (secado total)	
	Minutos	Horas	Minutos	Horas	Minutos	Horas
P1	150	2.5	300	5		24
P2	240	4	345	5.8		24
Promedio		3.3		5.5		24

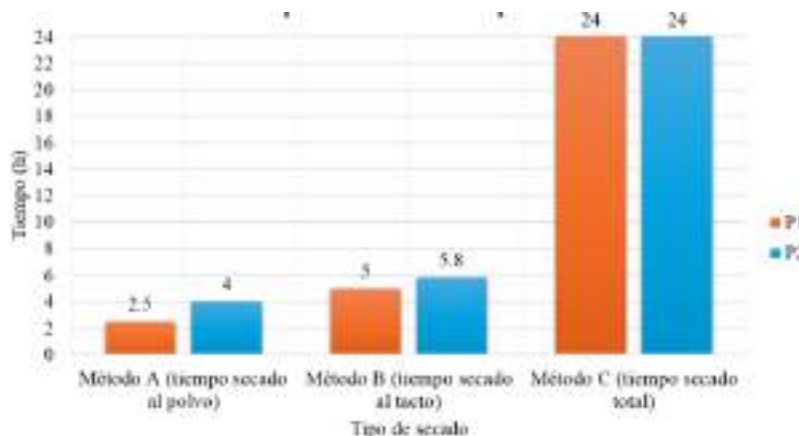


Fig. 45 Tiempo de secado, curado y formación de película seca pinturas naturales P1 y P2.

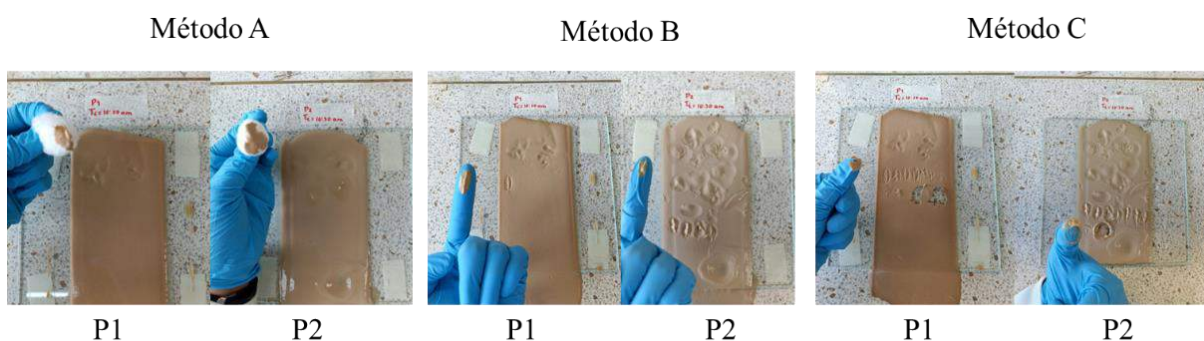


Fig. 46 Resultado ensayo tiempo de secado, curado y formación de película seca pinturas naturales P1 y P2.

Del ensayo de cuarteamiento aplicando una película de pintura de alto espesor se logró determinar que en ninguna de las dos pinturas naturales formuladas se generaron fisuras o grietas debido a la tensión del proceso de formación de película durante la fase de secado, al comparar los resultados con la normativa técnica, las pinturas P1 y P2 cumplen con el requerimiento para pinturas Tipo 1. Sin embargo, las muestras de pintura P1 y P2 presentaron un cambio en la coloración del recubrimiento, en la primera muestra se presentaron manchas de coloración blanca y en la segunda muestra se presentó un color homogéneo más claro y brillante en toda la superficie de película aplicada.

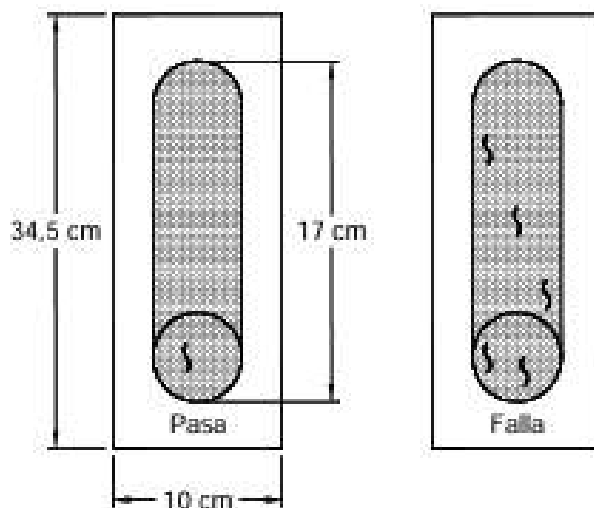


Fig. 47 Patrón de referencia ensayo cuarteamiento aplicando un alto espesor.



Fig. 48 Resultado ensayo cuarteamiento aplicando un alto espesor pinturas naturales P1 y P2.

Por otra parte, del ensayo de entizamiento se pudo determinar que la pintura P1 cumple el requerimiento de la norma técnica al no presentar polvo friable por el método A (tela de terciopelo negra); sin embargo, al evaluar el revestimiento por el método B (dedo índice humedecido) la muestra de pintura no cumple con el requisito y se observa desprendimiento de partículas de

pigmento. En cuanto a la pintura P2, la muestra no cumple con el requerimiento del método A y del método B por la presencia de polvo friable y desprendimiento de partículas de pigmento.

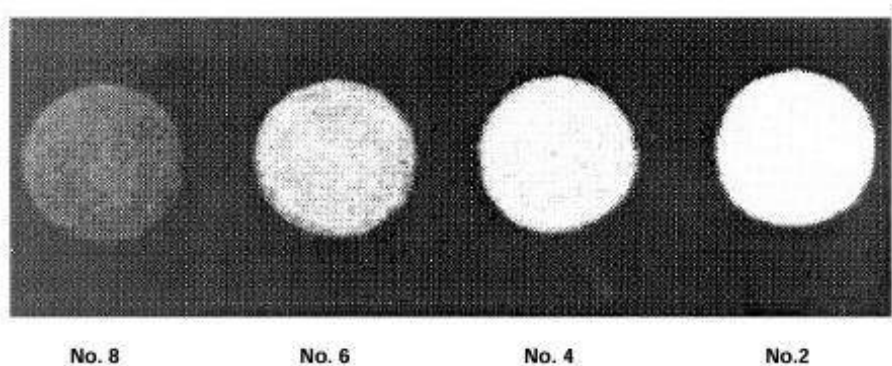


Fig. 49 Patrón de referencia fotográfico No 1 ensayo grado de entizamiento.

Método A: tela terciopelo negra

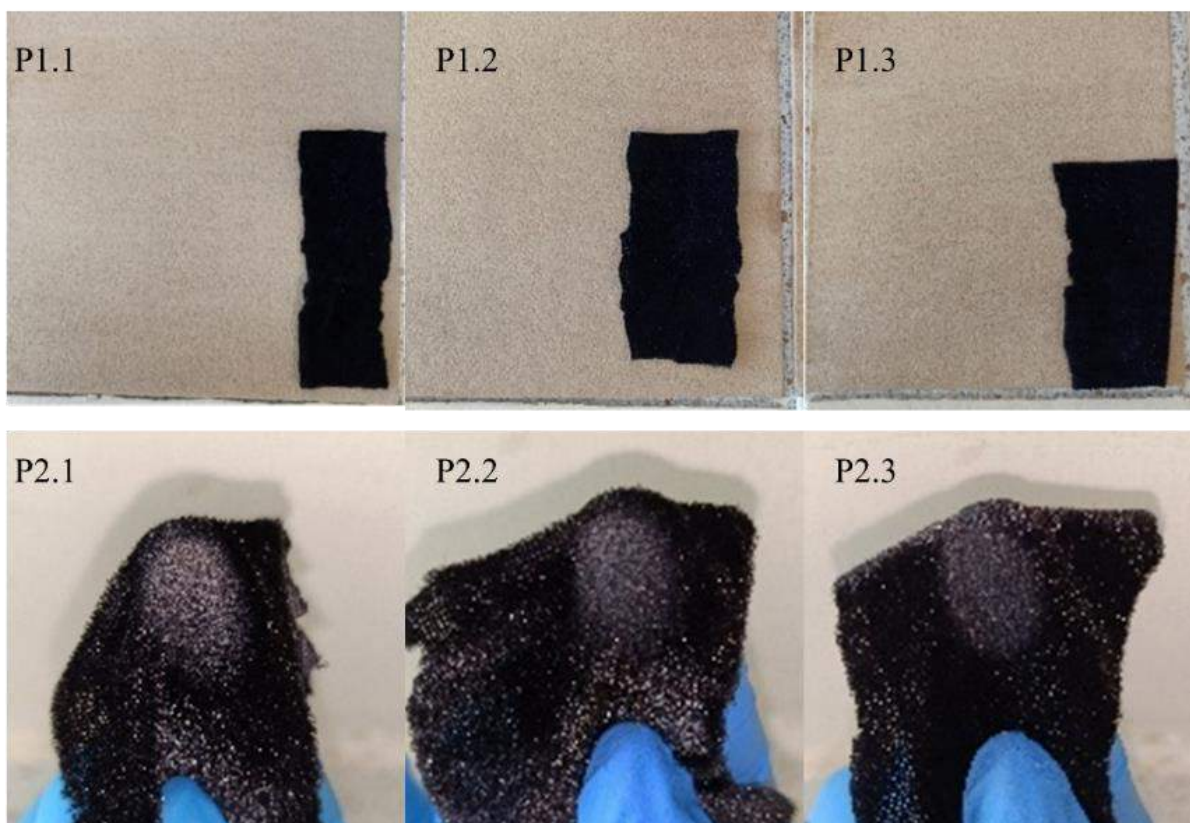


Fig. 50 Resultados ensayo grado de entizamiento, método A, pinturas naturales P1 y P2.

Método B: dedo índice humedecido



Fig. 51 Resultados ensayo grado de entizamiento, método B, pinturas naturales P1 y P2.

B. Etapa 2: Evaluación antifúngica de la pintura con nano TiO_2 contra el ataque del hongo *Aspergillus Níger*

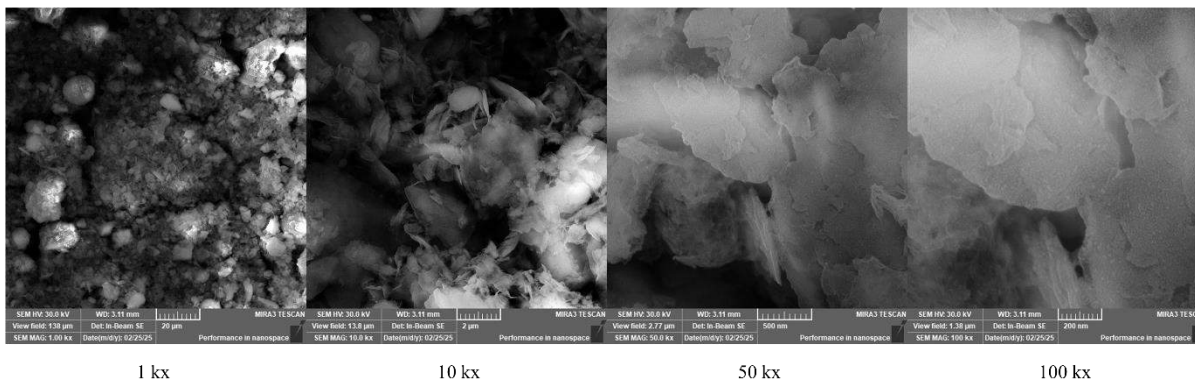
- Dispersión de nano TiO_2 en pintura natural P2 por el método de cavitación ultrasónica

El proceso de dispersión por cavitación ultrasónica acompañado con un ajuste de pH de la pintura P2 de un valor fuertemente alcalino (12) a un valor ligeramente alcalino (8) permitió observar a través del microscopio SEM cambios en la estructura de la película sin nanopartículas y en la estabilidad de la dispersión del nanofluido.

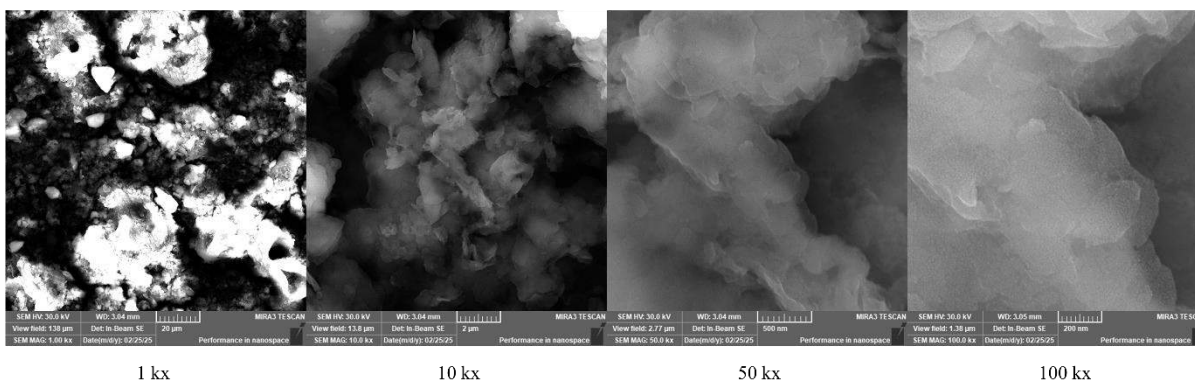
De la pintura P2 sin nanopartículas se observó inicialmente una superficie de película seca rugosa y porosa, con estructura laminar desorganizadas (con diferentes orientaciones e inclinaciones), muy unidas entre sí y con presencia de algunas partículas de gran tamaño en forma esférica definida o en forma cristalina característico de partículas de almidón de yuca con tamaño promedio de 99 nm y partículas de alumbre respectivamente como se observa en la Fig. 52; comparando este resultado con la literatura [43], [44], [45], [93], la presencia de agregados o aglomerados en forma laminar corresponde a estructuras de partículas de arcilla que con el proceso de preparación se unieron por la acción de sus fuerzas electrostáticas y el material aglomerante, la proporción de este componente (40% el volumen del pigmento) fue la adecuada para cubrir completamente las partículas coloidales debido a que se observan espacios de coloración oscura rellenos entre las partículas de pigmento. A medida que se iba disminuyendo el pH de la pintura

P2 se observó una mejor organización de las capas laminares y pasaron a estar más paralelas al plano de la película.

Pintura P2 sin nanopartículas pH= 12



Pintura P2 sin nanopartículas pH= 10



Pintura P2 sin nanopartículas pH= 8

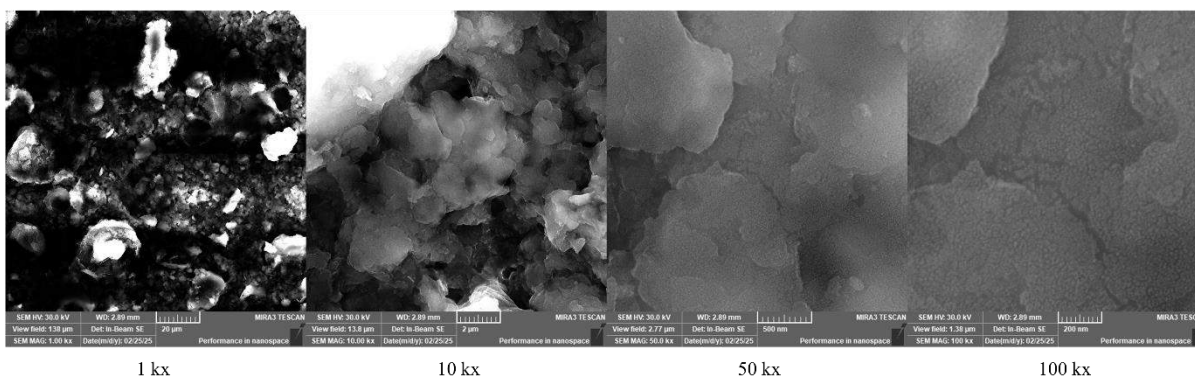
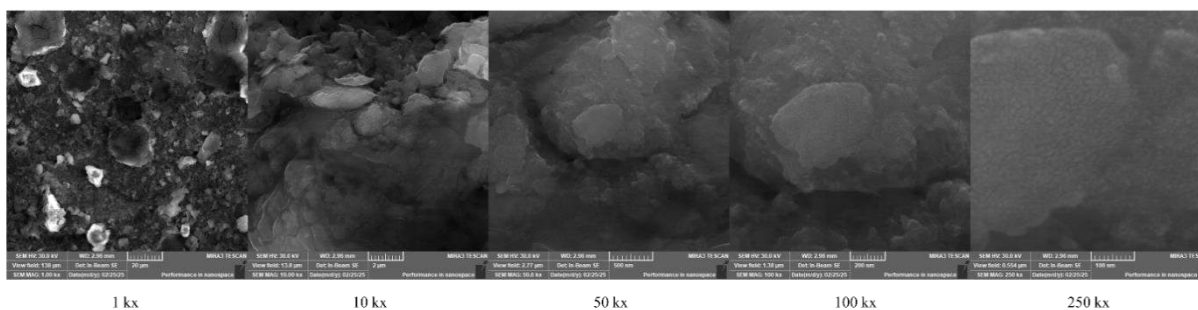


Fig. 52 Micrografías SEM a 1 kx, 10 kx, 50 kx y 100 kx de pintura P2 sin nanopartículas a pH 12, 10 y 8 respectivamente.

Al observar la pintura P2 con 1%v de nanopartículas de TiO_2 dispersas durante 30 minutos a diferentes pH, se tuvo como resultado una superficie muy parecida a la observada inicialmente con partículas esféricas en un rango de tamaño inferior a los 100 nm, con forma esférica definida

pero también aglomeradas formando estructuras cilíndricas llamadas nanoestructuras sobre las láminas y entre ellas, distribuidas de manera uniforme por toda la superficie. Como se observa en la Fig. 53. la disminución del pH hizo que esta distribución de nanopartículas fuera más estable y homogénea en la superficie de las láminas, así como también que incrementara la dispersión de las nanopartículas debido a que al presentarse un valor mayor de pH el potencial zeta de las nanopartículas se vuelve cada vez más negativo lo que hace que se presenten mayores fuerzas de repulsión entre las partículas [94].

Pintura P2 con nanopartículas pH= 10



Pintura P2 con nanopartículas pH= 8

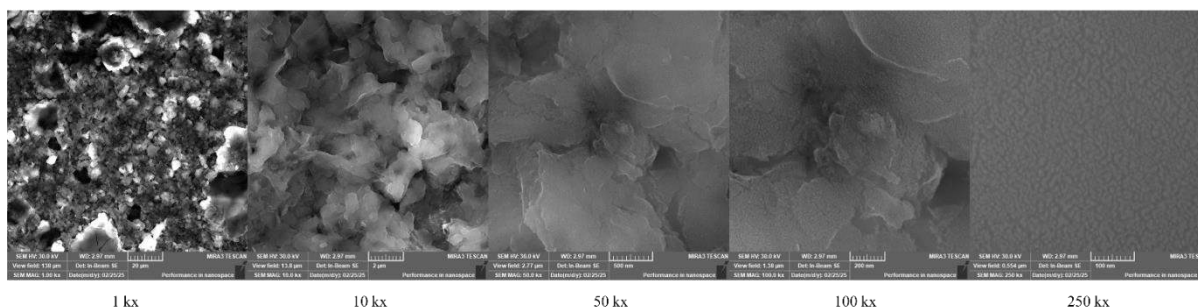


Fig. 53 Micrografías SEM a 1 kx, 10 kx, 50 kx y 100 kx de pintura P2 sin nanopartículas a pH 12, 10 y 8 respectivamente.

Por otra parte, el análisis de la composición química EDS en la pintura P2 sin nanopartículas mostro un valor promedio de carbono del 52.20%, nitrógeno del 4.88%, oxígeno del 35.29% y magnesio del 6.95%, como se puede observar en la Fig. 54. Los elementos de carbono y oxígeno en la muestra de pintura P2 componen aproximadamente el 90.5% de la película seca lo cual representa componentes primarios de los pigmentos minerales, pasta de cal, mucilago de nopal (extracto vegetal) y alumbre; por otra parte el contenido de nitrógeno y magnesio representa componentes como el almidón de yuca y mucilago de nopal.

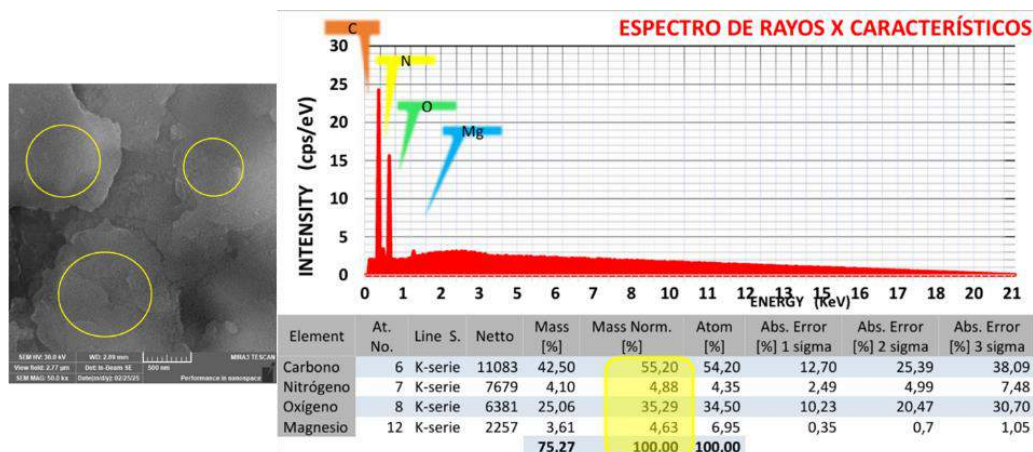


Fig. 54 Composición química pintura P2 sin nanopartículas pH = 8.

Al agregar las nanopartículas de TiO_2 en forma de nanofluidos con diferentes concentraciones y tiempos de dispersión en ultrasonido a la mezcla de la pintura P2, la observación en el microscopio SEM permitió evidencia la presencia de partículas en tamaños inferiores a 100 nm con forma esférica definida pero también en forma de nanoestructuras aglomeradas, que a medida que aumentaba el tiempo de sonicación el nanomaterial se presentaba más disperso en la superficie; por otra parte, al aumentar la concentración de nanopartículas, el valor de titanio aumentaba en la superficie, sin embargo en las concentración de 0.5% el valor de titanio disminuyó lo cual supone que una mayor cantidad de nanopartículas pudieron quedar recubiertas por el aglomerante y no adheridas sobre este.

Como se muestra en la Tabla 27 la muestra de pintura P2 con nanopartículas de TiO_2 más dispersas de manera homogénea y estable, y con mayor % en masa de titanio fue el espécimen con 0.3% (los resultados de EDS fueron tomados para muestras dispersas solo durante 10 minutos para corroborar la presencia de nanopartículas en los especímenes de prueba comparado con el resultado de la pintura sin nanomaterial).

TABLA XXVII

**COMPOSICIÓN QUÍMICA PINTURA P2 CON NANOPARTÍCULAS DE TiO_2 ,
VARIANDO LA CONCENTRACIÓN DEL NANOMATERIAL**

Elemento	% masa P2	% masa P2 + 0.1%	% masa P2 + 0.3%	% masa P2 + 0.5%
C	52.20	59.25	49.97	49.38
N	4.88	2.81	4.45	3.48
O	35.29	23.55	29.14	33.80
Mg	4.63	4.75	5.85	4.98
Ti	0.00	9.65	10.60	8.37

- Crecimiento, aislamiento y suspensión de esporas fúngicas

Inicialmente, se prepararon medios de cultivo PDA y Sabouraud, se añadió 20 ml de medio de cultivo a cada una de las seis cajas de Petri de prueba inicial para determinar en qué medio crecería mejor el hongo en estudio. Como resultado, después de 72 horas de incubación a 30°C y humedad relativa mayor a 80%, el medio de cultivo PDA presentó menor contaminación de otras colonias en comparación con el medio de cultivo Sabouraud. A partir de este resultado se inició el proceso de preparación de medios de cultivo para crecimiento y prueba, en total se usaron 16 cajas de Petri para crecimiento y aislamiento del hongo y 30 cajas de Petri para la prueba antifúngica, en la siguiente ecuación se presenta el volumen de agua destilada y peso del medio de cultivo PDA usados para la preparación de 46 cajas de Petri.

$$\text{Volumen agua destilada (ml)} = \frac{20 \text{ ml}}{1 \text{ caja de Petri}} \times 46 \text{ cajas de P.} = 920 \text{ ml} \quad \text{Ecuación (33)}$$

$$\text{Peso medio de cultivo PDA} = \frac{39 \text{ g}}{1000 \text{ ml}} \times 920 \text{ ml} = 35.88 \text{ g} \quad \text{Ecuación (34)}$$

Después de realizar la inoculación del medio de cultivo PDA con la muestra biológica del frijol en descomposición en cámara húmeda de vinagre – agua, usando la técnica de punción y manteniendo en incubación durante 7 días, las características macro y microscópicas de las colonias desarrolladas evidenciaron un crecimiento de especies fúngicas tales como *Rhizopus Stolonifer* en el repique 1 de la siembra 1 y *Aspergillus Níger* en los demás repiques de la siembra 1 y 2, como se muestra en la Fig. 55.

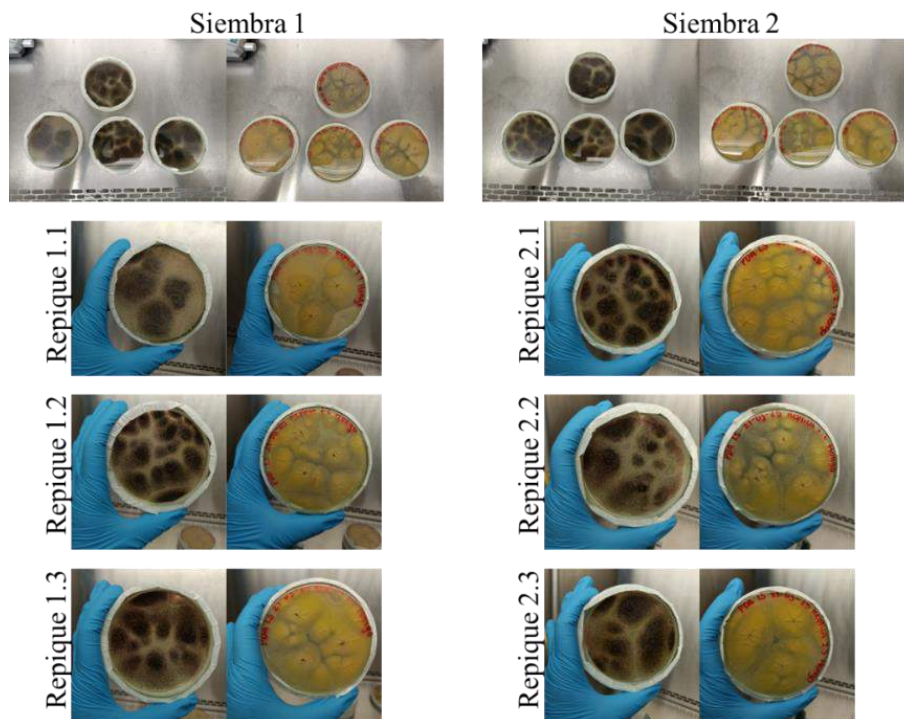


Fig. 55 Crecimiento y aislamiento del hongo *Aspergillus Níger* en medio de cultivo PDA.

Macroscópicamente se observó, durante las primeras 72 horas de crecimiento, colonias de crecimiento rápido con aspecto blanco grisáceo, textura algodonosa y aterciopelada, y al finalizar los 7 días de incubación la presencia de cabezas conidiales de coloración negra organizadas en círculos dispersos alrededor del punto inicial de inoculación y alrededor de él; en el reverso del medio de cultivo la coloración era de tono amarillo crema con formas de “estrella” en las zonas de punción. En la réplica 1.1, el crecimiento se mantuvo con una textura algodonosa – vellosa de color blanco grisáceo que ocupaba todo el espacio de la caja de Petri (crecimiento ilimitado) y en el reverso la coloración se mantuvo en un tono blanco crema, de esta manera se pudo determinar inicialmente la contaminación de este medio de cultivo.

Por otra parte, microscópicamente se observó la presencia de un micelio septado y hialino fúngico, con cabezas esféricas con dos series de filiales y conidios redondos o globulosos de pared rugosa con protuberancias entrelazadas de coloración azul oscura, las cabezas conidiales eran de gran tamaño y cubrían toda la vesícula dando una forma típica radiada y biselada como se muestra en la Fig. 56.

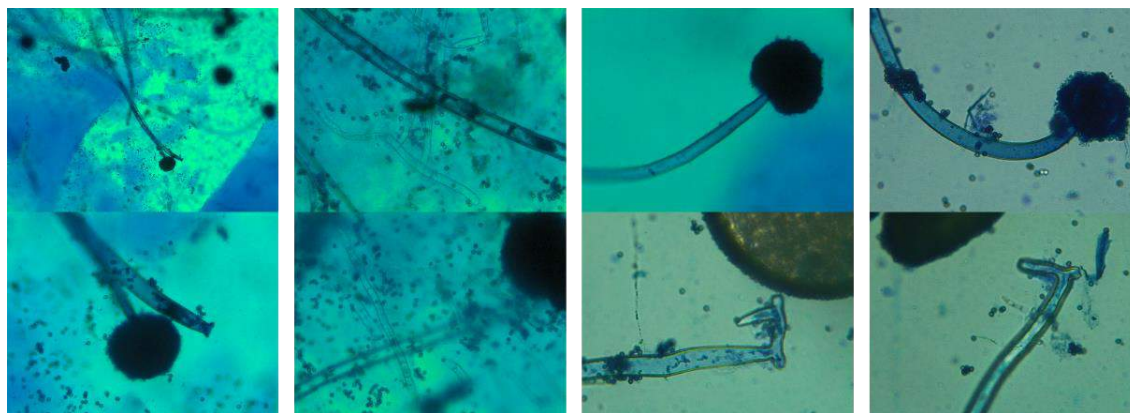


Fig. 56 Micrografías hongo *Aspergillus Níger* en microscopio óptico 4x, 10 x y 40 x aumentos.

También se observó la presencia de un organismo con micelio hialino cenocítico con formas de rizoides de los cuales se conectaban estructuras de esporangióforos y estolones, los primeros de gran longitud y no ramificados y los segundos de gran tamaño semiesférico de coloración azul oscura como se muestra en la Fig. 57.

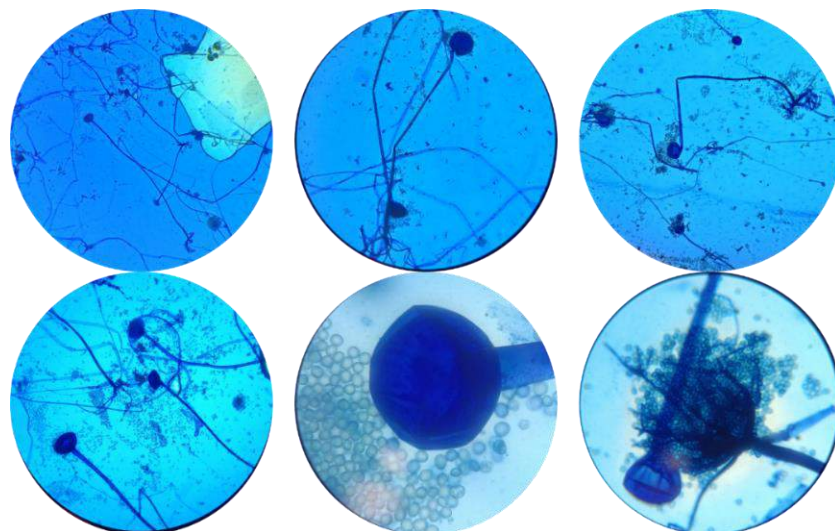


Fig. 57 Micrografías hongo *Rhizopus Stolonifer* en microscopio óptico 4x, 10 x y 40 x aumentos.

- Evaluación antifúngica de la pintura natural P2 con nano TiO_2 , método de ensayo ASTM D5590-17

Los registros fotográficos de la semana 1, 3 y 4 permitieron observar macroscópicamente el crecimiento adecuado del hongo *Aspergillus Níger* en los medios de cultivos de prueba; sin embargo, en la réplica 3 de la muestra P2 – 0.3% - 20 min y en las réplicas de la muestra P2 – 0.5% - 20 min no se observó crecimiento de colonias desde la semana 1 hasta la semana 4 de exposición.

A partir del análisis del registro fotográfico en el software ImageJ se obtuvo como resultado los valores de porcentaje de cobertura que se presentan en la Tabla 28; se puede evidenciar que la

pintura P2 + 0.1% nano TiO₂ presento un crecimiento intenso del hongo cubriendo más del 60% de la superficie expuesta en todas las semanas analizadas, la pintura P2 + 0.3% nano TiO₂ presento disminución en el porcentaje de cobertura de un nivel de crecimiento intenso (> 60%) a moderado (> 30 a 60%) después de dispersar 20 minutos el nanomaterial en todas las semanas analizadas, y la pintura P2 + 0.5% nano TiO₂ presento un aumento de la actividad fúngica después de dispersar el nanomaterial de 10 a 20 minutos en ultrasonido debido a que el porcentaje de cobertura alcanzo un valor inferior al 10% el cual representa un nivel de resistencia 1 en el que solo se evidencian rastros de crecimiento fúngico; sin embargo, la disminución en el porcentaje de cobertura de la pintura P2 + 0.3% y P2 + 0.5% nano TiO₂ no mejoro a los 30 minutos de dispersión del nanomaterial, y por el contrario se presentó una recolonización fúngica que llevo a un aumento de cobertura entre el 30 a más del 60% de la superficie expuesta.

TABLA XXVIII

**RESULTADOS PORCENTAJE DE COBERTURA EN DISCOS DE PRUEBA CON
PINTURA P2 + NANO TIO₂ EXPUESTAS AL HONGO A. NÍGER**

Tiempo de dispersión	No semana	% cobertura en P2 + 0.1% TiO₂	% cobertura en P2 + 0.3% TiO₂	% cobertura en P2 + 0.5% TiO₂
10 minutos	1	81.69%	67.68%	48.17%
	3	71.55%	67.40%	46.83%
	4	71.41%	69.41%	46.62%
20 minutos	1	81.28%	49.87%	7.78%
	3	75.61%	51.35%	8.10%
	4	77.99%	54.54%	5.85%
30 minutos	1	66.37%	60.09%	64.89%
	3	64.36%	59.35%	65.11%
	4	66.04%	62.54%	57.22%

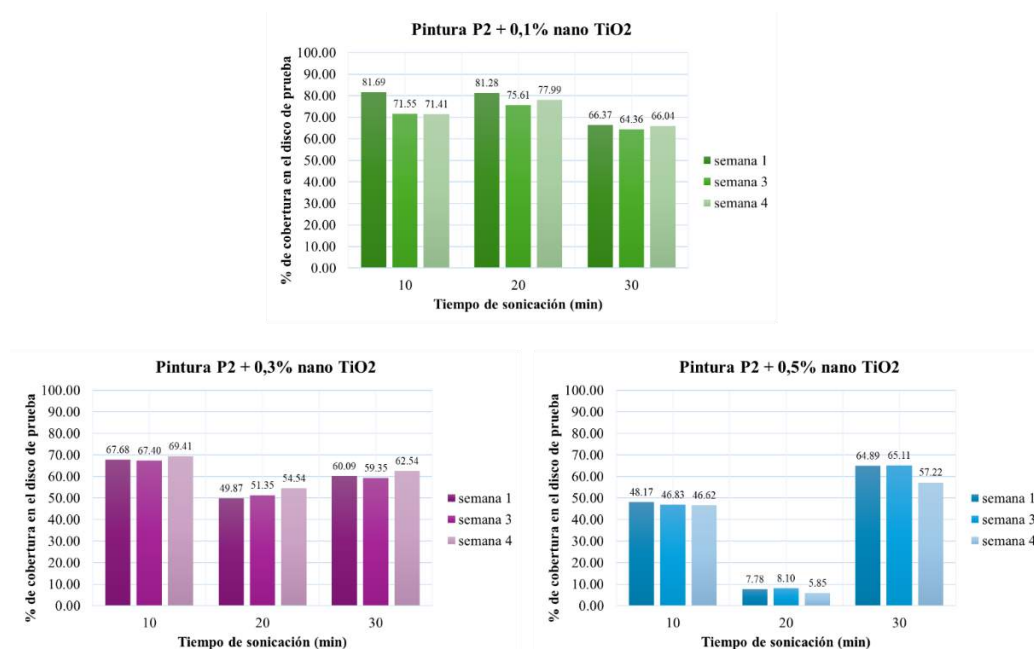
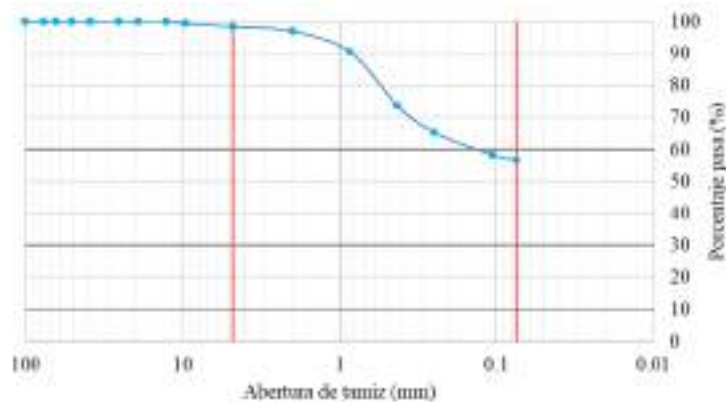


Fig. 58 Porcentajes de cobertura de esporas fúngicas sobre discos de prueba con pintura natural P2 + nano TiO₂.

C. Etapa 3: Determinación de la resistencia mecánica y durabilidad de la pintura con nano TiO₂ aplicada sobre BTC

- Caracterización de propiedades fisicoquímicas y mecánicas del suelo para fabricación de BTC

De los resultados obtenidos del ensayo de tamaños de partículas por el método de tamizado se pudo clasificar el suelo para BTC como un suelo fino con 1.57% partículas de grava, 41.76% partículas de arena y 56.67% partículas de material fino; la curva granulométrica de la Fig. 59 permite observar que el suelo no cuenta con un valor de diámetro efectivo D₁₀ y D₃₀.



De los resultados obtenidos del ensayo de limite liquido de la Tabla 29, el suelo para BTC presento una humedad de 51%.

TABLA XXIX
RESULTADOS ENSAYO LÍMITE LIQUIDO SUELO PARA BTC

No capsula	No golpes	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)	Peso agua (g)	Contenido de humedad (%)
17	34	11.58	7.55	4.03	53.58
48	23	7.68	5.08	2.60	51.18
478	14	7.50	5.10	2.40	47.06

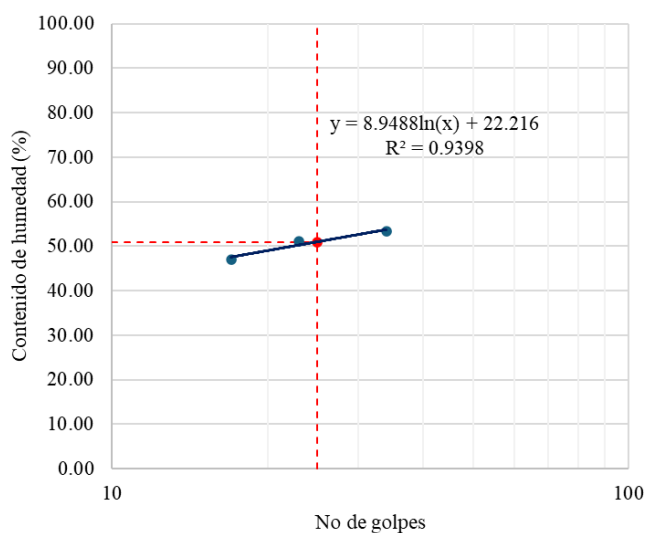


Fig. 60 Limite liquido suelo para BTC.

$$\text{límite liquido (LL)} = 8.9488 \ln(x) + 22.216; x = 25 \text{ golpes}$$

Ecuación (35)

$$\text{límite liquido (LL)} = 8.9488 \ln(25) + 22.216 = 51,0211\% = 51\%$$

De los resultados obtenidos del ensayo de limite plástico de la Tabla 30, el suelo para BTC presento una humedad de 20% e índice de plasticidad de 31%.

TABLA XXX
RESULTADOS ENSAYO LÍMITE DE PLASTICIDAD SUELO PARA BTC

No capsula	Peso suelo húmedo (G)	Peso suelo seco (g)	Peso del agua (g)	Contenido de humedad (%)
14	6.87	5.76	1.11	19.27
24	4.48	4.00	0.80	20.00
Promedio				19.64

Índice de plasticidad = Límite Líquido – Límite Plástico

Ecuación (36)

Índice de plasticidad = 51 – 20 = 31%

Por otra parte, a partir de los resultados obtenidos en el ensayo de límite líquido y límite plástico se logró tener un acercamiento del comportamiento del suelo en el gráfico de plasticidad de Casagrande de la Fig. 61. Teniendo en cuenta lo anterior, el suelo en estudio para BTC se clasificó como una arcilla de alta plasticidad o compresibilidad (CH).

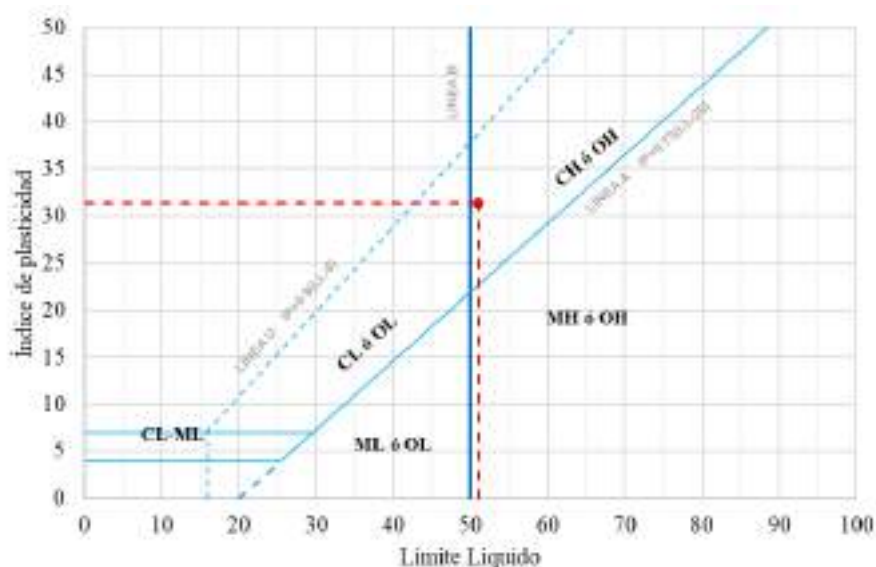


Fig. 61 Carta de plasticidad Casagrande del suelo para BTC.

Del ensayo Proctor estándar se obtuvo como resultado una densidad seca máxima de 1.703 g/cm³ y humedad óptima de 18%, como se muestra en la Tabla 31.

$$\text{Densidad húmeda } (\rho_H) \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \text{constante de conversión } (K) \times \left(\frac{\text{peso suelo compactado } (g)}{\text{volumen del molde } (cm^3)} \right)$$

$$\text{Densidad húmeda } (\rho_H) \left(\frac{g}{cm^3} \right) = 1 \times \left(\frac{1420}{942,509} \right) = 1,507$$

Ecuación (37)

$$\text{Contenido de humedad } (\%) = \frac{(\text{peso capsula} + \text{suelo húmedo}) - (\text{peso capsula} + \text{suelo seco})}{(\text{peso capsula} + \text{suelo seco}) - \text{peso capsula}}$$

$$\text{contenido de humedad } (\%) = \frac{112,290 - 104,700}{104,700 - 31,490} = \frac{7,59}{73,21} \times 100 = 10,367\%$$

Ecuación (38)

$$\text{Densidad seca } (\rho_d) \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{\text{densidad húmeda}}{1 + \frac{\text{contenido de humedad}}{100}}$$

Ecuación (39)

$$\text{Densidad húmeda } (\rho_H) \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{1,507}{1 + \left(\frac{10,367}{100} \right)} = 1,365 \quad \text{Ecuación (40)}$$

TABLA XXXI
RESULTADOS ENSAYO PROCTOR ESTÁNDAR EN SUELO PARA BTC

Parámetro	Valor			
Tipo de ensayo	Proctor estándar			
Método de ensayo	Método A – molde 4"			
Peso inicial (g)	3000			
Condición de la muestra	Seca al horno a 110°C durante 24 horas			
Humedad inicial (%)	10			
Incrementos de humedad (%)	4			
No de incrementos	3			
No ensayo	1	2	3	4
No molde	8	8	8	8
No capas	3	3	3	3
No golpes por capa	25	25	25	25
Peso molde (g)	3758	3758	3758	3758
Peso molde + suelo compactado (g)	5178	5473	5649	5613
Peso suelo compactado (g)	1420	1715	1891	1855
Volumen molde (cm ³)	942.509	942.509	942.509	942.509
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.507	1.820	2.006	1.968
Contenido de humedad (%)	10.367	13.484	17.785	21.461
Densidad seca (g/cm ³)	1.365	1.603	1.703	1.620

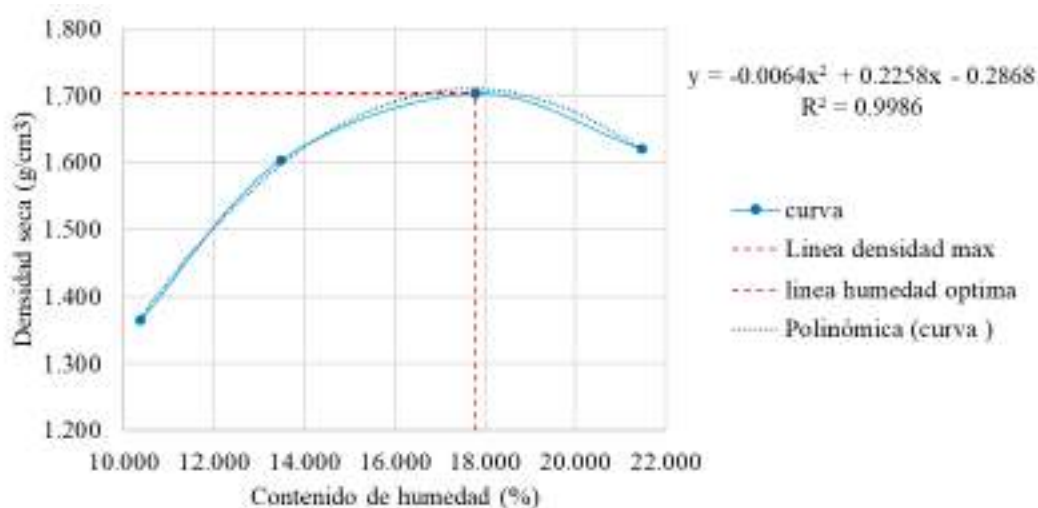


Fig. 62 Curva compactación suelo para BTC, ensayo Proctor estándar.

A partir de las pruebas de caracterización vernácula en el suelo para BTC, se obtuvo como resultado que el suelo en estudio presentó poca cantidad de partículas grandes (gravas y arenas) comparadas con las partículas pequeñas (limos y arcillas); durante el proceso de separación se disgregaron algunos terrones en partículas más pequeñas al ejercer presión con la yema de los dedos, aquellos terrones que no se disgregaron se consideran piedras. En estado seco se considera un material inorgánico debido al color brillante y los tonos pardos; en estado húmedo, el suelo presentó una coloración parda pero más oscura que en estado seco.

Esta coloración del suelo se da por la concentración de minerales, tamaño de cristal, grado de cementación y posibles sustituciones isomórficas de óxidos de hierro como los oxihidroxidos (Goethita) presente con frecuencia en un sistema cristalino ortorrómbico en suelos tropicales, de climas húmedos o templados [95].



Fig. 63 Tamaño y color de partículas de suelo para BTC.

Los resultados obtenidos del ensayo de corte o brillo muestran que el suelo en estudio se caracteriza por tener un color brillante en la mayoría de sus zonas observadas, es decir que posee una cantidad significativa de partículas de arcilla en su composición. Sin embargo, no es posible afirmar que se encuentra completamente lisa la superficie de corte, lo cual indica que en su composición también se presentan partículas de arena y limo. Durante el manejo de la muestra en cada uno de los ensayos aplicados, la porción de suelo fue frotada entre los dedos y la sensación sobre estos fue de limo que cubría los dedos como si fuera un talco; sin embargo se sentían partículas de arena gruesa y al humedecer la porción de tierra se logró moldear una esfera de manera sencilla sin requerir mucho esfuerzo o ejercer presión. Por lo anterior, se puede afirmar que la muestra de suelo representa un suelo fino.



Fig. 64 Ensayo de corte o brillo en suelo para BTC

En cuanto al olor, durante el proceso de excavación el material se encontraba en estado húmedo con presencia de algunos insectos/animales como gusanos y hormigas; sin embargo, no presentaba olor a materia orgánica en descomposición en estado húmedo. Cuando se secó el material a temperatura ambiente para la realización de los ensayos no se presentó olor de materia orgánica en descomposición y el material vegetal (restos de hojas, ramas, insectos/animales) que aun contenía fue retirado manualmente. Al humedecer la muestra de suelo y frotarla entre las manos al momento de lavarlas se evidencio la presencia de partículas más grandes que las arenas. Sin embargo en su mayoría la muestra presento apariencia pegajosa haciendo necesaria una gran cantidad de agua y fricción para poder retirar por completo el material, lo cual indica la presencia de arcillas.



Fig. 65 muestra de suelo para BTC.

Al moldear una muestra de suelo en estudio en forma de esfera de 3 a 4 cm de diámetro, se evidencio la presencia de muchas fisuras de poca profundidad en las zonas laterales, se puede afirmar que la porción de suelo presenta un conjunto de partículas de arena y arcilla, estas últimas permite que no se dé la desintegración del material después de la caída del material a una altura de 1 m.



Fig. 66 Test caída de bola, suelo para BTC.

Los resultados obtenidos después de la medición de las alturas de sedimentación T1, T2 y T3 a los 60 minutos de reposo se presentan en la Tabla 32. Con los datos obtenidos, se determinó la fracción de arcilla, limos y arenas sedimentadas a partir de las siguientes ecuaciones. El suelo en estudio presentó una fracción de arcilla de 23%, una fracción de limo de 24% y una fracción de grava y arena de 54%, con lo cual se clasifica en el diagrama textural como un suelo arenoso arcilloso apto para la elaboración de BTC sin requerir el uso de materiales estabilizadores.

$$\text{Fracción de arcilla (\%)} = \frac{T3 - T2}{T3} \times 100$$

Ecuación (41)

$$\text{Fracción de arcilla (\%)} = \frac{12.3 - 9.5}{12.3} \times 100 = 22.764\%$$

$$\text{Fracción de limos (\%)} = \frac{T2 - T1}{T3} \times 100$$

Ecuación (42)

$$\text{Fracción de limos (\%)} = \frac{9.5 - 6.6}{12.3} \times 100 = 23.577\%$$

$$\text{Fracción de grava y arena (\%)} = \frac{T1}{T3} \times 100$$

Ecuación (43)

$$\text{Fracción de grava y arena (\%)} = \frac{6.6}{12.3} \times 100 = 53.658\%$$

TABLA XXXII

RESULTADOS ENSAYO TEXTURA DEL SUELO PARA BTC, MÉTODO IN – SITU

No muestra	T1 (cm)	T2 (cm)	T3 (cm)
1	6.60	9.50	12.30
2	6.60	9.50	12.30
3	6.60	9.50	12.30
Promedio	6.60	9.50	12.30

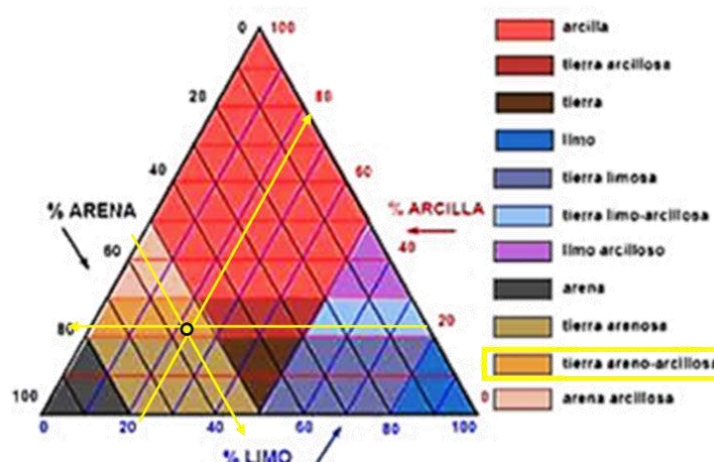


Fig. 67 Diagrama textural para clasificación del suelo para BTC

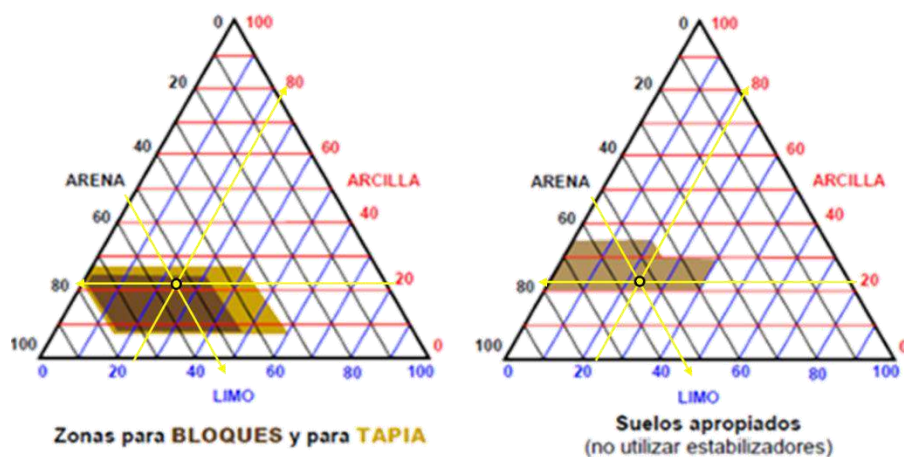


Fig. 68 Diagrama textural para uso del suelo en construcción con tierra.

Durante la realización de la prueba de cordón o consistencia se observa que la muestra logra formar un cilindro de gran longitud (cordón) con facilidad, al momento de amasar esta muestra en forma de esfera se presentó una alta maleabilidad en el material lo que demuestra que el suelo en estudio contiene gran cantidad de partículas de arcilla; al presionar la esfera formada con el pulgar y el índice se observó que no es posible deshacerla con facilidad ya que requiere de un gran esfuerzo. A partir de los resultados se puede clasificar el suelo como un material arcilloso de alta a media plasticidad.



Fig. 69 Ensayo consistencia del suelo para BTC.

Al desarrollar la prueba de la cinta se evidencio que la formación de cilindros de 3 a 6 mm de diámetro con longitudes de 25 a 30 cm se llevó a cabo sin dificultad. Por lo tanto se afirma que la muestra de suelo ensayada se clasifica como un suelo de alta plasticidad o alto contenido de partículas de arcilla.



Fig. 70 Ensayo cohesión del suelo para BTC.

Durante el desarrollo de la prueba de exudación el suelo en estudio requirió de 26 a 30 golpes para presentar humedad en la superficie; por lo tanto, se puede afirmar que el suelo en estudio tiene una reacción de exudación lenta haciendo que al presionar la muestra con los dedos se deforme.



Fig. 71 Ensayo exudación del suelo para BTC.

La resistencia por ruptura y aplastamiento la prueba de resistencia seca permite evidenciar la dureza del material y el nivel del contenido de partículas de arcilla que actúan como elemento cohesivo. Las muestras de suelo moldeadas en forma de pastillas de 2 a 3 cm de diámetro se dejaron secar durante 3 días en una zona de almacenamiento protegidas de la intemperie y cambios

climáticos. Se evidencio, después de los días de curado, que el comportamiento del material al ejercer presión con el pulgar y el índice fue de alta resistencia y esfuerzo de ruptura. A partir de los resultados el material presenta una plasticidad y contenido de arcillas alto.



Fig. 72 Ensayo resistencia seca del suelo para BTC.

El suelo en estudio fue evaluado por triplicado para determinar el promedio de la longitud de rotura. De los resultados obtenidos, se presentó una ruptura a una distancia de 12,1 cm en promedio; por lo tanto se puede afirmar que el suelo para BTC tiene el contenido ideal de partículas de arcilla.



Fig. 73 Test del rollo, suelo para BTC.

A partir de la prueba de compresión se evaluó la resistencia del material a esfuerzos de compresión inducidos en la maquina universal. El resultado de esfuerzo (σ) fue calculado con las siguiente ecuación.

$$\sigma(\text{MPa}) = \left(\frac{\text{Carga de rotura } (P)(\text{kN})}{\text{area de la suerficie } (A)(\text{m}^2)} \right) \times 10^{-3} \quad \text{Ecuación (44)}$$

$$\sigma(\text{MPa}) = \frac{5,6}{0,015} \times 10^{-3} = 0,37 \text{ MPa}$$

De los resultados de la Tabla 33 se evidencia que los elementos de tierra en forma de cubos tienen en promedio una resistencia a la compresión de 0,40 MPa, 0,34 MPa y 0,36 MPa a los 7, 14 y 28 días de curado. Según lo establecido en la normativa, el valor de resistencia admisible (0,29 MPa) se cumple para cada uno de los especímenes ensayados. Por lo tanto se comprueba que el suelo en estudio es adecuado para realizar los elementos constructivos de BTC.

TABLA XXXIII
RESULTADOS ENSAYO DE COMPRESIÓN EN CUBOS, SUELO PARA BTC

No muestra	Días de curado	Área (m ²)	Carga de rotura (KN)	Esfuerzo (MPa)
1	7	0.0015	5.6	0.37
2	7	0.0015	6.5	0.43
Promedio				0.40
3	14	0.0015	4.9	0.33
4	14	0.0015	5.2	0.35
Promedio				0.34
5	28	0.0015	5.1	0.34
6	28	0.0015	5.6	0.37
Promedio				0.36

Por otra parte, los resultados obtenidos en la Tabla 34. Permiten observar una mayor resistencia después del tiempo de curado de 28 días en comparación con los resultados del día 7 y 14, en promedio se obtiene una resistencia de compresión de 0,91 MPa, 1,10 MPa y 2,05 MPa para los cilindros de 7, 14 y 28 días de curado respectivamente. Comparando los resultados con la norma DIN 18954, la cual establece que la resistencia a la compresión permisible en elementos de construcción en tierra es de 3 a 5 Kg/cm² (0.29 a 0.49 MPa), se puede evidenciar que los valores de resistencia cumplen con el valor de resistencia debido a que son mayores que el rango mencionado. Por lo tanto se comprueba que el suelo en estudio es idóneo para la fabricación de BTC.

TABLA XXXIV
RESULTADOS ENSAYO DE COMPRESIÓN EN CILINDROS, SUELO PARA BTC

No muestra	Días de curado	Área (m ²)	Carga de rotura (KN)	Esfuerzo (MPa)
1	7	0.01	7.61	0.97
2	7	0.01	6.62	0.84
Promedio				0.91
3	14	0.01	7.89	1.00
4	14	0.01	9.45	1.20
Promedio				1.10
5	28	0.01	13.1	1.67
6	28	0.01	19.16	2.44
Promedio				2.05

- Evaluación de la resistencia mecánica de la pintura natural con nano TiO₂ sobre BTC

De los resultados obtenidos en el ensayo de erosión humedad por goteo de agua sobre bloques de tierra comprimida sin pintura (BSP), con pintura sin (BCP) y con nanopartículas de TiO₂ (BCP + TiO₂) que se exponen en la Tabla 35, se puede observar que las profundidades de erosión (D), en promedio, del bloque de tierra sin pintura, con pintura y con pintura + nano TiO₂ son de 17 mm, 12 mm y 9 mm respectivamente.

TABLA XXXV
RESULTADOS ENSAYO EROSIÓN HÚMEDA POR CAÍDA DE AGUA EN BTC CON RECUBRIMIENTO FOTOCATALÍTICO

Tipo de bloque de prueba	No muestra	Altura de caída (cm)	Tiempo de caída (min)	Angulo de inclinación (°)	Profundidad de erosión (mm)
BSP	1	40	30	29	15
	2	40	30	28	15
	3	40	30	26	20
	Promedio				17
BCP	1	40	30	28	10
	2	40	30	29	15
	3	40	30	27	10
	Promedio				12
BCP + TiO ₂	1	40	30	29	10
	2	40	30	29	10
	3	40	30	30	8
	Promedio				9

La aplicación de un revestimiento en forma de pintura mejora el nivel de resistencia al deterioro por erosión húmeda de un rango de 5 a 4 (no apto a revestir o proteger de lluvias directas) y cuando al revestimiento se le aplican nanomateriales disminuye el nivel de resistencia de 4 a 3

(se recomienda proteger de lluvias directas) según la Tabla 36. Por lo tanto la pintura con 0,5% de nanopartículas TiO_2 dispersa durante 20 minutos en ultrasonido permite mejorar la resistencia de BTC ante el efecto de la erosión húmeda; sin embargo el recubrimiento aun no es apto para uso en exteriores debido a que los especímenes de ensayo sufren daño superficial sin pérdida de masa por efecto de la escorrentía, como se muestra en la Fig. 74.

TABLA XXXVI
NIVEL DE RESISTENCIA EROSIÓN HÚMEDA SOBRE BTC CON RECUBRIMIENTO FOTOCATALÍTICO

Profundidad de erosión del ensayo (mm)	Profundidad de erosión literatura (mm)	Nivel de resistencia a la erosión húmeda
17	$D > 15$	5
12	$10 < D > 15$	4
9	$5 < D > 10$	3

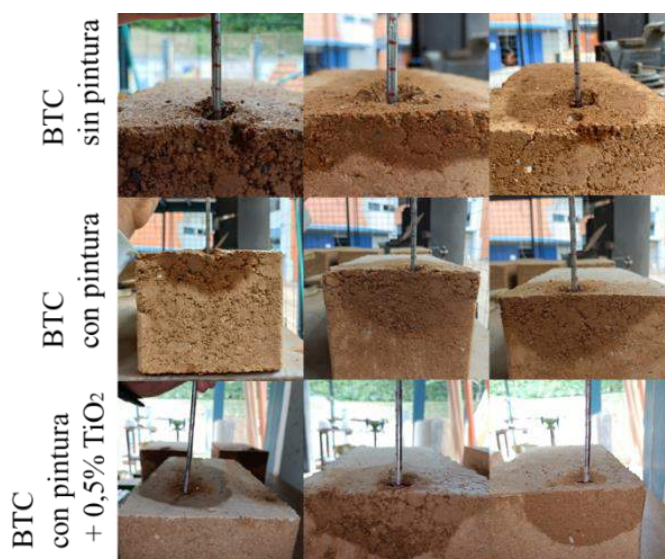


Fig. 74 Ensayo resistencia a la erosión húmeda en BTC de prueba sin pintura, con pintura, con pintura con nanopartículas.

Por otra parte, de los resultados obtenidos del ensayo de abrasión se puede determinar que el nivel de resistencia en todos los bloques de prueba (BSP, BCP y BCP + TiO_2) es de nivel 4 que representa a elementos de construcción que deben ser revestidos. Sin embargo, al comparar los resultados entre cada uno de los bloques de prueba se puede observar que la resistencia a la abrasión erosión mejoro al aplicar el recubrimiento de la pintura pero no presento un cambio significativo con la adición de las nanopartículas de TiO_2 .

Superficie cepillada (S) cm^2

$$= (\text{largo de la probeta (mm)} \times \text{ancho de la cepillada (mm)}) \times 0.01$$

Ecuación
(45)

$$S (cm^2) = 293 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 0.01 = 87,90 \text{ cm}^2$$

$$C_a = \frac{\text{Superficie cepillada (S)} \left(\frac{cm^2}{g}\right)}{m_{inicial} - m_{final}}$$

Ecuación
(46)

$$C_a = \frac{95.23}{9213 - 8787} = 0.2235 \left(\frac{cm^2}{g}\right)$$

TABLA XXXVII
RESULTADOS ENSAYO ABRASIÓN EN BTC CON RECUBRIMIENTO
FOTOCATALÍTICO

Tipo de bloques de prueba	No muestra	Masa inicia (g)	Masa final (g)	L (mm)	I (mm)	S (cm ²)	Coefficiente de abrasión (cm ² /g)	Nivel de resistencia a la abrasión
BSP	1	9100	8460	293	30.00	87.90	0.22	4 (Ca ≤ 2)
	2	9330	9160	293	30.00	87.90		
	3	9210	8740	293	37.50	109.90		
	Promedio	9213	8787			95.23		
BCP	1	9150	9020	290	35.00	101.50	0.99	4 (Ca ≤ 2)
	2	9180	9100	293	40.00	117.20		
	3	9220	9080	295	35.00	103.25		
	Promedio	9183	9066			116.32		
BCP + TiO ₂	1	9180	9060	294	35.00	102.90	0.41	4 (Ca ≤ 2)
	2	9470	9025	296	40.00	118.40		
	3	9240	9020	294	35.00	102.90		
	Promedio	9297	9035			108.07		



Fig. 75 Ensayo resistencia a la abrasión en BTC de prueba sin pintura, con pintura, con pintura con nanopartículas

VII. CONCLUSIONES

El desarrollo de la pintura en base a materiales pétreos y nanopartículas de TiO_2 , permitió desarrollar un material innovador en los procesos constructivos en tierra vernáculos y procesos nanotecnológicos para la protección del Patrimonio Cultural ante procesos de biodeterioro y acción del agua; el uso de estos revestimientos con capacidad antimicrobiana incrementa la sostenibilidad de los sistemas constructivos.

En la etapa 1 del proyecto se establecieron las propiedades fisicoquímicas del suelo usado como pigmento mineral tales como composición granulométrica o textura que dio como resultado un suelo arcilloso compuesto de 30% de partículas de arena y 70% de partículas finas en mayor proporción coloidales que confieren un comportamiento medianamente plástico a la pintura reflejado en valor de límite líquido de 44%, límite plástico de 14% e índice de plasticidad de 30% y límite de contracción de 12%, también mostro una densidad de 1,32 g/cm³ y un pH de 7,51 en agua y 6.32 en electrolito KCl lo cual lo clasifica dentro de un rango ligeramente alcalino en agua y ligeramente ácido en KCl con comportamiento de intercambiador catiónico no salino. Adicionalmente, se caracterizó las nanopartículas de TiO_2 como un nanomaterial altamente disperso con forma esférica y tamaño promedio del cristalino en un rango de 9 nm y 32 nm encontrados en el SEM – EDS.

En la etapa 2 del proyecto se optimizó el método de dispersión de nanopartículas de TiO_2 por medio de cavitación ultrasónica combinado con ajuste de pH de la pintura con almidón de yuca (P2), la pintura con un valor de pH de 8 y concentración de nanopartículas de TiO_2 de 0,3%v presentó el mayor porcentaje de titanio en su composición elemental, con un valor de 10,60%. Sin embargo, al evaluar el efecto del nanomaterial en el comportamiento antifúngico ante el ataque del hongo *Aspergillus Níger*, a través del análisis de cobertura en el software ImageJ, se puede establecer que la muestra de pintura P2 con una concentración de 0,5%v de nanopartículas de TiO_2 dispersas durante 20 minutos en ultrasonido presenta un porcentaje de inhibición aproximadamente del 90% de esporas sobre los discos de prueba en medio de cultivo PDA.

Finalmente, en la etapa 3, donde se evaluó el efecto del nanomaterial en el comportamiento físico mecánico de la pintura P2, se evidenció una disminución en la profundidad de erosión húmeda reduciendo de un valor de 17 mm a 9 mm que representa a un elemento constructivo de un nivel de resistencia 5 o no apto a un nivel de resistencia 3 en el cual se recomienda proteger de lluvias directas. Por otra parte, la resistencia a la abrasión se evidenció un efecto positivo al

aumentar el coeficiente de abrasión de los bloques de prueba sin pintura ($0,22 \text{ cm}^2/\text{g}$) a los bloques de prueba con pintura sin nanopartículas ($0,99 \text{ cm}^2/\text{g}$) pero no continuo el aumento de esta resistencia al aplicar la pintura P2 con 0.5%v de nanopartículas dispersas durante 20 minutos de ultrasonido; por el contrario, el valor del coeficiente de abrasión disminuyo a $0,41 \text{ cm}^2/\text{g}$. En ninguno de los dos ensayos de resistencia y durabilidad se lograron cumplir los niveles óptimos para revestimientos exteriores establecidos por los protocolos de ensayo de elementos constructivos en tierra y la normativa internacional.

VIII. RECOMENDACIONES

Con el fin de dar continuidad a la investigación, se sugiere el estudio de la influencia del tamaño, forma, estructura e interacciones entre las partículas de los pigmentos en las propiedades de la pintura en estado húmedo y de la película seca tales como finura de dispersión, poder cubriente, brillo, resistencia a la abrasión húmeda, remoción de manchas, resistencia al álcali y determinación de la estabilidad acelerada. También se recomienda realizar un análisis químico de los componentes naturales que interactúan con las partículas de pigmento (mucilago de nopal, almidón de yuca) para entender más a fondo las interacciones químicas que permiten obtener una película de pintura para exterior estable, compatible con las construcciones en tierra y antifúngica.

En cuanto a la síntesis de nanopartículas de TiO_2 , se recomienda buscar alternativas de funcionalización, compatibles con la metodología de química verde, para aumentar la capacidad fotocatalítica del nanomaterial a partir de la ampliación del rango de longitudes de onda en el espectro de luz visible.

Finalmente, se recomienda analizar la capacidad hidrofóbica y/o hidrofílica de la pintura sobre la superficie de elementos constructivos en tierra revestidos previamente con otra capa de cobertura más fina que el sustrato original a través de la medición de la dureza superficial, arrancamiento directo o resistencia al corte.

IX. REFERENCIAS

- [1] S. R. Bolaños, “El uso masivo de la tierra como material de construcción en Colombia,” *Scielo*, vol. 20, no. 2, 2007.
- [2] C. E. Sánchez Gama, “La arquitectura de tierra en Colombia, procesos y culturas constructivas,” *Apuntes: Revista de estudios sobre patrimonio cultural*, vol. 20, no. 2, 2007.
- [3] D. M. Ruiz, N. Barrera, J. C. Reyes, C. López, and M. Restrepo, “An approach to Colombian Andean earthen architecture in urban environments: a case study of Bogotá Historic Centre,” *Journal of Architectural Conservation*, vol. 29, no. 2, 2023, doi: 10.1080/13556207.2022.2160556.
- [4] D. M. Ruiz *et al.*, “Strengthening of historical earthen constructions with steel plates: Full-scale test of a two-story wall subjected to in-plane lateral load,” *Constr Build Mater*, vol. 363, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129877.
- [5] C. López Pérez, “Revestimientos en tierra en edificaciones patrimoniales en Colombia,” *REVISTA NODO*, vol. 12, no. 23, 2019, doi: 10.54104/nodo.v12n23.145.
- [6] M. L. S. Oliveira, A. Neckel, L. F. O. Silva, G. L. Dotto, and L. S. Maculan, “Environmental aspects of the depreciation of the culturally significant Wall of Cartagena de Indias – Colombia,” *Chemosphere*, vol. 265, 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129119.
- [7] D. Pinna, “Microbial growth and its effects on inorganic heritage materials,” in *Microorganisms in the Deterioration and Preservation of Cultural Heritage*, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-69411-1_1.
- [8] S. A. Ruffolo, M. F. La Russa, N. Rovella, and M. Ricca, “The Impact of Air Pollution on Stone Materials,” 2023. doi: 10.3390/environments10070119.
- [9] M. Sameño Puerto, “El biodeterioro en edificios del patrimonio cultural: metodología de evaluación de tratamientos biocidas,” Universidad de Sevilla, Sevilla, 2018.
- [10] S. M. Zacarías, S. Marchetti, O. M. Alfano, and M. de los M. Ballari, “Photocatalytic paint for fungi growth control under different environmental conditions and irradiation sources,” *J Photochem Photobiol A Chem*, vol. 364, 2018, doi: 10.1016/j.jphotochem.2018.05.034.
- [11] S. Borrego and A. Molina, “Fungal assessment on storerooms indoor environment in the National Museum of Fine Arts, Cuba,” *Air Qual Atmos Health*, vol. 12, no. 11, 2019, doi: 10.1007/s11869-019-00765-x.

- [12] F. L. Guerra *et al.*, “Biodeterioration of mortar coating in historical buildings: Microclimatic characterization, material, and fungal community,” *Build Environ*, vol. 155, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.03.017.
- [13] E. Gallego-Cartagena *et al.*, “A comprehensive study of biofilms growing on the built heritage of a Caribbean industrial city in correlation with construction materials,” *Int Biodeterior Biodegradation*, vol. 147, 2020, doi: 10.1016/j.ibiod.2019.104874.
- [14] R. D. Garcés Manosalva, “Caracterización de la Microbiocenosis Asociada al Deterioro en Edificaciones Antiguas y Posibles Bienes de Interés Cultural en el área Metropolitana de Bucaramanga: una Aproximación Metagenómica,” Universidad de Santander, 2023.
- [15] A. J. Fonseca *et al.*, “Anatase as an alternative application for preventing biodeterioration of mortars: Evaluation and comparison with other biocides,” *Int Biodeterior Biodegradation*, vol. 64, no. 5, 2010, doi: 10.1016/j.ibiod.2010.04.006.
- [16] M. F. La Russa *et al.*, “Testing the antibacterial activity of doped TiO₂ for preventing biodeterioration of cultural heritage building materials,” *Int Biodeterior Biodegradation*, vol. 96, 2014, doi: 10.1016/j.ibiod.2014.10.002.
- [17] M. F. La Russa *et al.*, “Nano-TiO₂ coatings for cultural heritage protection: The role of the binder on hydrophobic and self-cleaning efficacy,” *Prog Org Coat*, vol. 91, 2016, doi: 10.1016/j.porgcoat.2015.11.011.
- [18] S. Pal, V. Contaldi, A. Licciulli, and F. Marzo, “Self-cleaning mineral paint for application in architectural heritage,” *Coatings*, vol. 6, no. 4, 2016, doi: 10.3390/coatings6040048.
- [19] C. Pokhum, D. Viboonratanasri, and C. Chawengkijwanich, “New insight into the disinfection mechanism of *Fusarium monoliforme* and *Aspergillus niger* by TiO₂ photocatalyst under low intensity UVA light,” *J Photochem Photobiol B*, vol. 176, 2017, doi: 10.1016/j.jphotobiol.2017.09.014.
- [20] F. Gherardi, M. Roveri, S. Goidanich, and L. Toniolo, “Photocatalytic nanocomposites for the protection of European architectural heritage,” *Materials*, vol. 11, no. 1, 2018, doi: 10.3390/ma11010065.
- [21] I. Franco-Castillo, L. Hierro, J. M. de la Fuente, A. Seral-Ascaso, and S. G. Mitchell, “Perspectives for antimicrobial nanomaterials in cultural heritage conservation,” 2021. doi: 10.1016/j.chempr.2021.01.006.

- [22] Y. Cao, A. Salvini, and M. Camaiti, "Multi-functional TiO₂-based nanocomposite coating with durable superhydrophobicity and enhanced photocatalytic and antimicrobial properties for the sustainable maintenance of building stones," *Constr Build Mater*, vol. 404, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133139.
- [23] K. A. Whitehead *et al.*, "Nano-Titania Photocatalysis and Metal Doping to Deter Fungal Growth on Outdoor and Indoor Paint Surfaces Using UV and Fluorescent Light," *Micro*, vol. 5, no. 1, Mar. 2025, doi: 10.3390/micro5010005.
- [24] D. Estévez Parra, "Análisis del comportamiento fisicoquímico y de durabilidad de la pintura con nanopartículas de dióxido de titanio, para bloques de tierra comprimida, BTC, evitando el deterioro causado por el hongo *Aspergillus Níger*," Universidad Pontificia Bolivariana, Floridablanca, 2023.
- [25] C. Bertolin, "Preservation of cultural heritage and resources threatened by climate change," 2019. doi: 10.3390/geosciences9060250.
- [26] A. T. Fazio, A. Cavicchioli, D. S. A. Penna, F. S. Chambergo, and D. L. A. de Faria, "Towards a better comprehension of biodeterioration in earthen architecture: Study of fungi colonisation on historic wall surfaces in Brazil," *J Cult Herit*, vol. 16, no. 6, 2015, doi: 10.1016/j.culher.2015.04.001.
- [27] K. Mantilla *et al.*, "Characterization of biodeteriorating microorganisms in buildings in Bucaramanga, Colombia," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019. doi: 10.1088/1742-6596/1386/1/012104.
- [28] O. J. Esteban-Cantillo, B. Menendez, and B. Quesada, "Climate change and air pollution impacts on cultural heritage building materials in Europe and Mexico," *Science of the Total Environment*, vol. 921, 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170945.
- [29] S. Yadav and D. Purchase, "Biodeterioration of cultural heritage monuments: A review of their deterioration mechanisms and conservation," *Int Biodeterior Biodegradation*, vol. 201, May 2025, doi: 10.1016/j.ibiod.2025.106066.
- [30] L. F. Rodríguez-Alfaro, E. Luévano Hipólito, and L. M. Torres-Martínez, "Nanopartículas de TiO₂ fotocatalíticas incorporadas en materiales de construcción. ¡Construyamos edificios inteligentes!," *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, vol. 17, no. 32, 2023, doi: 10.22201/ceiich.24485691e.2024.32.69737.

- [31] C. M. Martins Neves, O. Faria, R. Rotondaro, P. Cevallos, and M. Hoffman, “Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra,” *PROTERRA*, 2009.
- [32] CRATerre, “Centro Internacional para la Construcción en Tierra.” [Online]. Available: <https://craterre.org/en/>
- [33] L. Guerrero Baca, “Arquitectura en tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva,” *Apuntes*, vol. 20, no. 2, 2007.
- [34] C. Neves and O. Borges Faria, *Técnicas de construcción con tierra*. 2011. [Online]. Available: www.redproterra.org
- [35] E. Juárez Badillo and A. Rico Rodríguez, *Mecánica de Suelos I: Fundamentos de mecánica de suelos*, Limusa. México, 2005.
- [36] E. A. Franco Urquiza and M. L. Maspoch Rulduá, “Estructura general de las arcillas utilizadas en la preparación de nanocompuestos poliméricos,” *Ingenierías*, vol. 12, no. 44, pp. 1–7, Sep. 2009.
- [37] A. M. Muskus Morales and C. S. Quintero Duque, *Manual de laboratorio: caracterización de suelos*. Bucaramanga, 2016.
- [38] FAO, “Portal de suelos de la FAO. Conservación de suelos,” 2019.
- [39] J. J. Cid Falceto, “Durabilidad de los bloques de tierra comprimida. evaluación y recomendaciones para la normalización de los ensayos de erosión y absorción,” Madrid, Mar. 2012.
- [40] J. M. Meza López, “Evaluación en ensayos de erosión acelerada aplicados a ladrillos de tierra comprimida, para la construcción de muros perimétricos en Huancayo,” Universidad Nacional del Centro del Perú, 2018.
- [41] I. Gharbage, F. Benmahiddine, and N. Sebaibi, “Mechanical, thermal and hydric properties of compressed earth blocks: A review,” Jun. 15, 2025, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.job.2025.112387.
- [42] F. J. Quiñónez and V. Ayala, “Evaluación de la adherencia de revestimientos en paredes,” *Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, pp. 1–10, Jul. 2014.
- [43] F. de P. Cardoso, R. de C. S. S. Alvarenga, A. F. de Carvalho, and M. P. F. Fontes, “Processos de produção e avaliação de requisitos de desempenho de tintas para a construção

- civil com pigmentos de solos,” *Ambiente Construído*, vol. 16, no. 4, pp. 167–183, Dec. 2016, doi: 10.1590/s1678-86212016000400112.
- [44] F. de P. Cardoso, “Os efeitos das características de pigmentos obtidos de solos sobre o desempenho de pinturas para edificações não industriais,” UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, Viçosa – minas gerais, 2020.
- [45] F. de P. Cardoso and A. F. Carvalho, *Manual cores da terra produção de tintas com pigmentos de solos*. Sao Paulo, 2023.
- [46] F. de P. Cardoso, “Desenvolvimento de processos de produção e avaliação do desempenho de tintas para a construção civil manufaturadas com pigmentos de solos,” Universidade Federal de Viçosa, 2015.
- [47] J. Aristizábal and T. Sánchez, *Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. Boletín de servicios agrícolas de la FAO*, vol. 163. 2007.
- [48] G. Ruiz Avilés, “Pólimeros Biodegradables a partir de almidón de yuca.,” *Eafit*, 2012.
- [49] L. Vargas Rodríguez, G. Arroyo Figueroa, C. H. Herrera Méndez, A. Pérez Nieto, M. I. García Vieyra, and J. R. Rodríguez Núñez, “Physical properties of mucilage prickly pear,” *Acta Univ*, vol. 26, no. NE-1, pp. 8–11, Mar. 2016, doi: 10.15174/au.2016.839.
- [50] P. Torres Soria, S. Cruz Flores, N. C. Peña Peláez, S. E. Fernández Mendiola, M. A. Rodríguez Ibarra, and A. Cruz Becerril, “La baba y el mucílago de nopal, una alternativa natural para la conservación de acabados arquitectónicos de tierra,” *Antropología*, no. 99, 2015.
- [51] A. V. Silva Cascante, C. A. Vásquez Mora, and G. del R. Uría Cevallos, “Determinación del uso del mucilago de nopal en la construcción de la época colonial (caso Convento de San Diego),” *Project, Design and Management*, vol. 2, pp. 95–118, 2020, doi: 10.29314/pdm.v2i1.433.
- [52] M. Novak and B. Ormsby, “Poly(Vinyl Acetate) Paints: A Literature Review of Material Properties, Ageing Characteristics, and Conservation Challenges,” 2023. doi: 10.3390/polym15224348.
- [53] L. Guerrero, M. Correia, and H. Guillaud, “Conservación del patrimonio arqueológico construido con tierra en iberoamérica,” *APUNTES*, vol. 25, no. 2, pp. 210–225, Dec. 2012.

- [54] L. Rainer, “Deterioration and Pathology of Earthen Architecture,” in *Terra Literature Review: An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation*, Los Ángeles, 2018, pp. 45–61.
- [55] R. Fort González, “La contaminación atmosférica en el deterioro del patrimonio monumental: medidas de prevención,” *Ciencia, Tecnología y Sociedad para una conservación sostenible del patrimonio pétreo*, no. March, 2007.
- [56] G. Minke, *Manual de Construcción en Tierra: La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*, Fin de Siglo. 2005.
- [57] M. E. David, R. M. Ion, R. M. Grigorescu, L. Iancu, and E. R. Andrei, “Nanomaterials used in conservation and restoration of cultural heritage: An up-to-date overview,” May 01, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/ma13092064.
- [58] Ş. Sungur, “Titanium Dioxide Nanoparticles,” in *Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications: Volumes 1-4*, vol. 1, Springer International Publishing, 2021, pp. 713–730. doi: 10.1007/978-3-030-36268-3_9.
- [59] A. A. Keller *et al.*, “Stability and aggregation of metal oxide nanoparticles in natural aqueous matrices,” *Environ Sci Technol*, vol. 44, no. 6, 2010, doi: 10.1021/es902987d.
- [60] I. Moreno Huerga, “Fotocatálisis en materiales en base de cemento: Evaluación de autolimpieza de fotocatalíticos en el espectro visible frente al uv,” Universidad Politécnica de Madrid, 2018.
- [61] N. M. Mahmoodi, M. Arami, N. Y. Limaee, and N. S. Tabrizi, “Kinetics of heterogeneous photocatalytic degradation of reactive dyes in an immobilized TiO₂ photocatalytic reactor,” *J Colloid Interface Sci*, vol. 295, no. 1, 2006, doi: 10.1016/j.jcis.2005.08.007.
- [62] M. Aslam, A. Z. Abdullah, and M. Rafatullah, “Recent development in the green synthesis of titanium dioxide nanoparticles using plant-based biomolecules for environmental and antimicrobial applications,” 2021. doi: 10.1016/j.jiec.2021.04.010.
- [63] V. Verma, M. Al-Dossari, J. Singh, M. Rawat, M. G. M. Kordy, and M. Shaban, “A Review on Green Synthesis of TiO₂ NPs: Synthesis and Applications in Photocatalysis and Antimicrobial,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 7, Apr. 2022, doi: 10.3390/polym14071444.
- [64] S. Mandal, P. Kumar, B. Satpathy, K. Das, and S. Das, “Nanostructured metal oxide based coating for the protection and conservation of cultural heritage: A comprehensive review,” Sep. 01, 2024, *Elsevier Masson s.r.l.* doi: 10.1016/j.culher.2024.08.001.

- [65] T. Pushpamalini, M. Keerthana, R. Sangavi, A. Nagaraj, and P. Kamaraj, "Comparative analysis of green synthesis of TiO₂ nanoparticles using four different leaf extract," in *Materials Today: Proceedings*, 2020. doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.438.
- [66] J. Roy, "The synthesis and applications of TiO₂ nanoparticles derived from phytochemical sources," 2022. doi: 10.1016/j.jiec.2021.10.024.
- [67] R. A. Gonçalves, R. P. Toledo, N. Joshi, and O. M. Berengue, "Green synthesis and applications of zno and tio₂ nanostructures," 2021. doi: 10.3390/molecules26082236.
- [68] A. Ghareeb, A. Fouda, R. M. Kishk, and W. M. El Kazzaz, "Unlocking the potential of titanium dioxide nanoparticles: an insight into green synthesis, optimizations, characterizations, and multifunctional applications," Dec. 01, 2024, *BioMed Central Ltd.* doi: 10.1186/s12934-024-02609-5.
- [69] ICONTEC International, "Pinturas al agua tipo emulsión NTC 1335," Mar. 2015.
- [70] ICONTEC International, "Calidad del suelo: Determinación de la textura por Bouyoucos NTC 6299," Nov. 2018.
- [71] ICONTEC International, "Calidad del suelo: Determinación de la humedad y del factor de corrección, expresado en base seca NTC 6230," Jun. 2017.
- [72] ASTM International, "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils," Oct. 15, 2007, *ASTM International, West Conshohocken, PA.* doi: 10.1520/D0422-63R07E02.
- [73] ASTM International, "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils," Jun. 01, 2017, *ASTM International, West Conshohocken, PA.* doi: 10.1520/D4318-17E01.
- [74] ASTM International, "Standard Test Methods for pH of Soils," Jul. 01, 2024, *ASTM International, West Conshohocken, PA.* doi: 10.1520/D4972-19R24E01.
- [75] ICONTEC International, "Calidad de suelo: Determinación de la conductividad eléctrica NTC 5596," Mar. 2008.
- [76] ICONTEC International, "Pinturas, método de ensayo para viscosidad mediante copa ford para viscosidad NTC 558," Jun. 1996.
- [77] ASTM International, "Standard Test Method for Volume Nonvolatile Matter in Clear or Pigmented Coatings," Jul. 01, 2022, *ASTM International, West Conshohocken, PA.* doi: 10.1520/D2697-22.

- [78] ICONTEC International, “Método de ensayo para la determinación del secado, curado, formación de película de recubrimientos orgánicos a temperatura ambiente NTC 598,” Sep. 2005.
- [79] ICONTEC International, “Pinturas: Determinación del cuarteamiento aplicando un espesor alto NTC 5032,” Feb. 2002.
- [80] ICONTEC Internacional, “Método de ensayo para evaluar el grado de entizamiento de películas de pintura exterior NTC 1457-6,” Aug. 1999.
- [81] ASTM International, “Standard Test Method for Determining the Resistance of Paint Films and Related Coatings to Fungal Defacement by Accelerated Four-Week Agar Plate Assay,” Nov. 01, 2021, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/D5590-17R21.
- [82] I. M. Mahbulul, E. B. Elcioglu, R. Saidur, and M. A. Amalina, “Optimization of ultrasonication period for better dispersion and stability of TiO₂–water nanofluid,” *Ultrason Sonochem*, vol. 37, 2017, doi: 10.1016/j.ultsonch.2017.01.024.
- [83] B. Lotfizadehdehkordi, A. Ghadimi, and H. S. C. Metselaar, “Box-Behnken experimental design for investigation of stability and thermal conductivity of TiO₂ nanofluids,” *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 15, no. 1, 2013, doi: 10.1007/s11051-012-1369-4.
- [84] T. Dagdevir and V. Ozceyhan, “Optimization of process parameters in terms of stabilization and thermal conductivity on water based TiO₂ nanofluid preparation by using Taguchi method and Grey relation analysis,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 120, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.105047.
- [85] J. Vidmar, R. Milačič, V. Golja, S. Novak, and J. Ščančar, “Optimization of the procedure for efficient dispersion of titanium dioxide nanoparticles in aqueous samples,” *Analytical Methods*, vol. 8, no. 5, 2016, doi: 10.1039/c5ay03305e.
- [86] C. M. Arnett, R. C. Wilson, and K. A. Guy, “Comparison of Antifungal Efficiencies of Photocatalytic and Antimicrobial-Infused Coatings,” 2020. [Online]. Available: <https://erdclibrary.on.worldcat.org/discovery>.
- [87] V. M. Campa Fernández, *Análisis de Imágenes de Microscopía con ImageJ & Fiji*. 2017. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/313768335>
- [88] M. Tapia R., “ImageJ para microscopía,” May 2013.
- [89] Red Argentina Protierra, “Protocolo de ensayos sobre elementos constructivos para la construcción con tierra,” 2020.

- [90] Red Argentina Protierra, “Protocolo de ensayos de campo para la identificación de suelos,” 2020.
- [91] ASTM International, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)),” Jul. 01, 2021, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/D0698-12R21.
- [92] D. F. Jaramillo J, *Introducción a la ciencia del suelo*. Medellín, 2002.
- [93] F. de P. Cardoso, A. Carvalho, and Fontes Maurício, “Resistência à abrasão de tintas imobiliárias produzidas com pigmentos obtidos por dispersão mecânica de solos,” *Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis*, Mar. 2014.
- [94] K. Solymos *et al.*, “Photocatalytic and surface properties of titanium dioxide nanoparticles in soil solutions,” *Environ Sci Nano*, vol. 11, no. 3, pp. 1204–1216, Jan. 2024, doi: 10.1039/d3en00622k.
- [95] O. Acevedo Sandoval, E. Ortiz Hernández, M. Cruz Sánchez, and E. Cruz Chávez, “Role of Iron Oxides in Soils,” *Terra Latinoamericana*, vol. 22, no. 4, pp. 485–497, Dec. 2004.