

“SÍNTESIS Y APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE SILICATO DE PLATA PARA EL MEJORAMIENTO DE PINTURA BLANCA CON BASE EN AGUA APLICADA EN SUPERFICIES DE HORMIGÓN, FIBROCEMENTO Y MADERA”.

R. Jeldres Aguayo¹, P. Salgado Mendoza², M. Villagrán Valenzuela³

RESUMEN: En el presente estudio se sintetizaron nanopartículas de silicato de plata para ser aplicadas al 5% de la masa en un recubrimiento comercial blanco con base en agua, con el fin de establecer comparaciones entre recubrimientos con y sin su adición. Se utilizaron probetas de dimensiones 10x10 cm de tres tipos de materiales distintos (madera, fibrocemento y hormigón) para aplicar los recubrimientos con las mismas dosificaciones. Además, se utilizaron probetas 5x5 cm de madera para comparar adherencia y mixtura bajo distintas dosificaciones de NPs-Ag₆Si₂O₇.

Las probetas 10x10cm fueron sometidas a distintas condiciones climáticas que nos ofrece la zona sur de Chile, específicamente la planicie litoral de la comuna de San Pedro de la Paz, depresión intermedia de la comuna de San Carlos y zona cordillerana de San Fabián de Alico, tras su sometimiento, se registraron los cambios y se analizaron sus capacidades de transferencia de calor. Además, otras probetas se sometieron a periodos de luz constante con rayaduras de distinto tipo para posteriormente someterse a un proceso de limpieza. Finalmente, algunas probetas de tamaño 5x5 cm fueron sometidas a un análisis de espectroscopia de reflectancia difusa para posteriormente ser sometidas a condiciones especiales para analizar la proliferación de hongos. Todo esto fue realizado con el fin de identificar propiedades autolimpiantes, antihongos y transferencias de calor.

PALABRAS CLAVES: Nanotecnología, autolimpiante.

ABSTRACT: In the present study, silver silicate nanoparticles were synthesized to be applied at 5% of the mass in a commercial water-based white coating, in order to establish comparisons between coatings with and without their addition. Test specimens of dimensions 10x10 cm made of three different types of materials (wood, fibrocement, and concrete) were used to apply the coatings with the same dosages. In addition, 5x5 cm wooden test specimens were used to compare adhesion and mixture under different dosages of NPs-Ag₆Si₂O₇.

The 10x10 cm specimens were subjected to different climatic conditions offered by the southern zone of Chile, specifically the coastal plain of the San Pedro de la Paz commune, the intermediate depression of the San Carlos commune, and the mountainous zone of San Fabián de Alico. After exposure, changes were recorded, and their heat transfer capabilities were analyzed. Additionally, other specimens were subjected to periods of constant light with various types of scratches and were subsequently cleaned. Finally, some 5x5 cm specimens underwent diffuse reflectance spectroscopy analysis and were then subjected to special conditions to analyze fungal proliferation. All of this was carried out to identify self-cleaning, antifungal, and heat transfer properties.

KEYWORDS: Nanotechnology, self-cleaning.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE. rjeldres@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE. psalgado@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE. mvillagran@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

Las pinturas con los años han dejado de ser solamente una película aplicada sobre una superficie aportando la cuota estética que el hogar necesita. Actualmente se cuenta con una alta gama de productos comerciales que poseen diversas propiedades que benefician a las estructuras aportándoles protección, impermeabilización, resistencia a la intemperie, resistencia a los hongos y el moho, entre muchas otras.

Dentro de la amplia gama de eventos que pueden afectar la integridad estética de una obra arquitectónica, se destaca el vandalismo, siendo la actividad del grafiti un fenómeno completamente impredecible capaz de ocasionar daños irreparables en la infraestructura. Estas formas de expresión están principalmente relacionadas con la visibilidad, notoriedad, elección del lugar, transgresión y a menudo como un medio para reaccionar y protestar mientras se permanece en completo anonimato (1). Otro evento, más previsible, aunque igualmente significativo, es la proliferación de hongos en superficies recubiertas. A pesar de que muchos recubrimientos disponibles en el mercado sugieren ofrecer una protección eficaz, esta no siempre se materializa de manera efectiva. Es debido a esto, que constantemente se están realizando propuestas de mejora en los recubrimientos, entre las que destaca el uso de nanotecnología en esta tarea.

La nanotecnología se refiere a la rama de la ciencia e ingeniería dedicada a diseñar, producir y utilizar estructuras, dispositivos y sistemas mediante la manipulación de átomos y moléculas a escala nanométrica, es decir, con una o más dimensiones del orden de los 100 nanómetros (100 millonésimas de milímetro) o menos (2). La aplicación de la nanotecnología se revela como un enfoque estratégico para la mejora de productos preexistentes, permitiendo potenciar y/o incorporar propiedades que se alineen con sus objetivos específicos. En este contexto, la comprensión detallada de las características inherentes de las nanopartículas y su capacidad de modificación se presenta como una premisa fundamental para el diseño y desarrollo efectivo de estas mejoras.

En base a investigaciones previas, hay nanopartículas que aportan beneficios a las pinturas, entre estas se encuentra la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc las cuales mejoran las propiedades físico-químicas de las pinturas, como la resistencia a la corrosión y la degradación, además de reducir el tiempo de curado (3). Otra de ellas son las nanopartículas de plata, que han demostrado exhibir propiedades que previenen la formación de biopelículas (ecosistemas microbianos), logrando una eficiencia de inhibición de hasta un 100% (4). Otras investigaciones indican que los nanosilicatos (materiales de silicio nanoestructurados) aportan propiedades antimicrobianas para pinturas a base de agua, (5). Tras estos análisis, se intuye que un recubrimiento comercial podría verse potenciando si se lograsen adherir ciertas características de ambas nanopartículas. En este sentido existe evidencia del excelente desempeño de nanopartículas de silicato de plata (NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$) degradando rápidamente contaminantes orgánicos y coloreados (6)(7). Además, estas nanopartículas actúan como fotocatalizadores, absorbiendo radiación visible para producir especies reactivas, las que son altamente efectivas en la eliminación de contaminantes (8).

En consecuencia, las NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ presentan un potencial destacado para mejorar las propiedades de las pinturas. La aplicación de estas nanopartículas en recubrimientos comerciales a base de agua carece de precedentes, motivando así la presente investigación que busca contribuir al conocimiento de las propiedades que estas pueden aportar a las pinturas blancas con base en agua, recubrimiento que es altamente comercializado en Chile.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar el efecto de NPs-Ag₆Si₂O₇ al ser incluidas en una pintura blanca con base en agua aplicada en superficies de hormigón, fibrocemento y madera en cuanto a su estabilidad frente a diversas condiciones climáticas y en sus propiedades autolimpiantes, antiadherentes, fungicidas y térmicas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Sintetizar NPs-Ag₆Si₂O₇.
- Realizar análisis de espectroscopia de reflectancia difusa (DRS)
- Evaluar el comportamiento de la pintura con y sin la adición de NP-Ag₆Si₂O₇ frente a condiciones climatológicas de la región del Biobío y Ñuble.
- Evaluar el comportamiento de la pintura con y sin la adición de NP-Ag₆Si₂O₇ frente a la potencial proliferación de hongos.
- Evaluar las propiedades autolimpiantes de la pintura con y sin la adición de NP-Ag₆Si₂O₇ sometido a rayados y tintes.
- Evaluar adherencia de la pintura con y sin NP-Ag₆Si₂O₇ tras someter las probetas a un procedimiento de limpieza.
- Realizar comparativas de transferencias de calor en probetas de distintos materiales con la aplicación de pintura con y sin adición de NP-Ag₆Si₂O₇.

3. METODOLOGÍA

3.1 Síntesis de NP-Ag₆Si₂O₇ y mezcla con pintura blanca con base en agua

Para la síntesis de NPs- Ag₆Si₂O₇ se siguió un procedimiento previamente establecido (Lou, 2014) el cual se describe a continuación: Se mezclaron 0,284 g de metasilicato de sodio (Na₂SiO₃) con 70 mL de agua desionizada bajo agitación constante. Luego, la solución se agregó lentamente a 30 mL de una solución de nitrato de sodio (AgNO₃) 0,1 M para generar precipitados de color marrón rojizo. Después de 30 minutos de agitación, las muestras (es decir, los precipitados) se separaron de la solución mediante filtración con bomba de vacío y papel filtro Whatman grado 1 sujeto al embudo Buchner. Los polvos de color marrón rojizo se obtuvieron después de lavar con agua desionizada y etanol tres veces, y se secaron a temperatura ambiente durante 6 horas.

Una vez familiarizado con el proceso de síntesis de esta nanopartícula se fueron aumentando las cantidades de nanopartículas fabricadas hasta tener una cantidad considerable para realizar pruebas de mixtura con el recubrimiento comercial con base en agua.

Se determinó que la aplicación se llevaría a cabo en probetas de 10x10 cm, totalizando 12 unidades destinadas a la aplicación del recubrimiento con nanopartículas y, además, otras 12 unidades con recubrimiento con base en agua sin nanopartículas para establecer parámetros comparativos. Según la ficha técnica del recubrimiento comercial (9), la cantidad de pintura a utilizar sería de 42 g, aplicando de 2 a 3 capas. Se diseñó un protocolo para establecer la cantidad adecuada de nanopartículas que deben mezclarse con esta pintura.

En consonancia con investigaciones previas donde emplearon NPs-ZnO en pinturas al óleo (10). Se estableció que una dosificación óptima de NP-Ag₆Si₂O₇ es al 2% de la masa de pintura. Con el fin de lograr resultados con diferencias notorias a simple vista, se llevaron a cabo mezclas al 2% y 5% de la masa de la pintura y así realizar las evaluaciones planteadas.

3.2 Análisis de espectroscopia de reflectancia difusa (DRS)

Las muestras compuestas por probetas de fibrocemento y madera, ambas con un contenido de nanopartículas del 5%, así como aquellas únicamente recubiertas con pintura blanca, fueron sometidas a un análisis de espectroscopia de reflectancia difusa, también conocida como DRS por sus siglas en inglés (Diffuse Reflectance Spectroscopy). Las probetas de hormigón fueron excluidas de este análisis debido que las dimensiones de las mismas excedían la capacidad del espectrofotómetro y su esfera de integración (ver Figura 1).

En el marco de este análisis, se examinó la reflectancia de las pinturas a diferentes longitudes de onda con el objetivo de establecer comparaciones significativas entre las muestras con y sin la presencia de NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$. Este enfoque permitió identificar el band gap (brecha de banda), que se refiere a la energía mínima necesaria para que un electrón se libere de su estado de enlace y pueda participar en la conducción (Figura 2) (11). Esto quiere decir que el análisis se orienta hacia la caracterización de las propiedades fotocatalíticas de las probetas recubiertas con pintura que contiene nanopartículas, propiedades que permiten acelerar una fotorreacción en presencia de un catalizador (12).

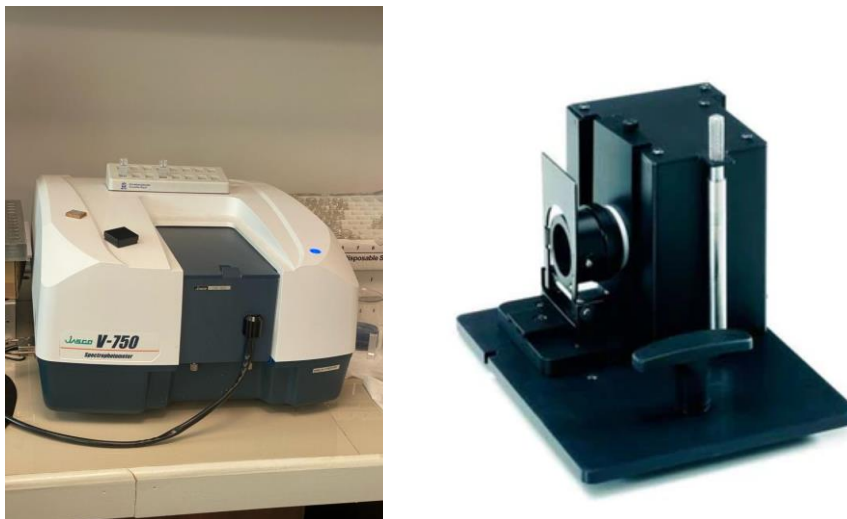


Figura 1: Espectrofotómetro V-750 y esfera de integración.
Fuente: Elaboración propia.

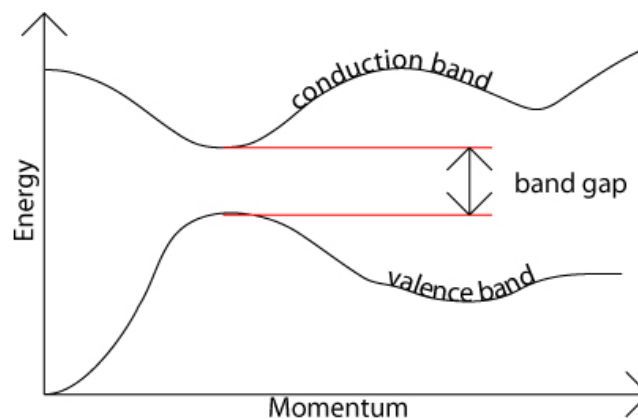


Figura 2: Interpretación de band gap.
Fuente: University of Cambridge.

3.3 Probetas sometidas a distintas condiciones climáticas

Tras establecer la dosificación de pintura con y sin nanopartículas, se procedió a pintar las probetas de 10x10cm de los materiales fibrocemento, hormigón y madera. El destino de las probetas se estableció en la zona centro sur de Chile, específicamente en la planicie litoral de San Pedro de la Paz, la depresión intermedia de la comuna de San Carlos y el sector cordillerano de la ciudad de San Fabián de Alico (Figura 3). Todo esto con el fin de estudiar el comportamiento de las pinturas sometidas a distintas humedades relativas y condiciones climatologías particulares de las zonas durante 30 días.

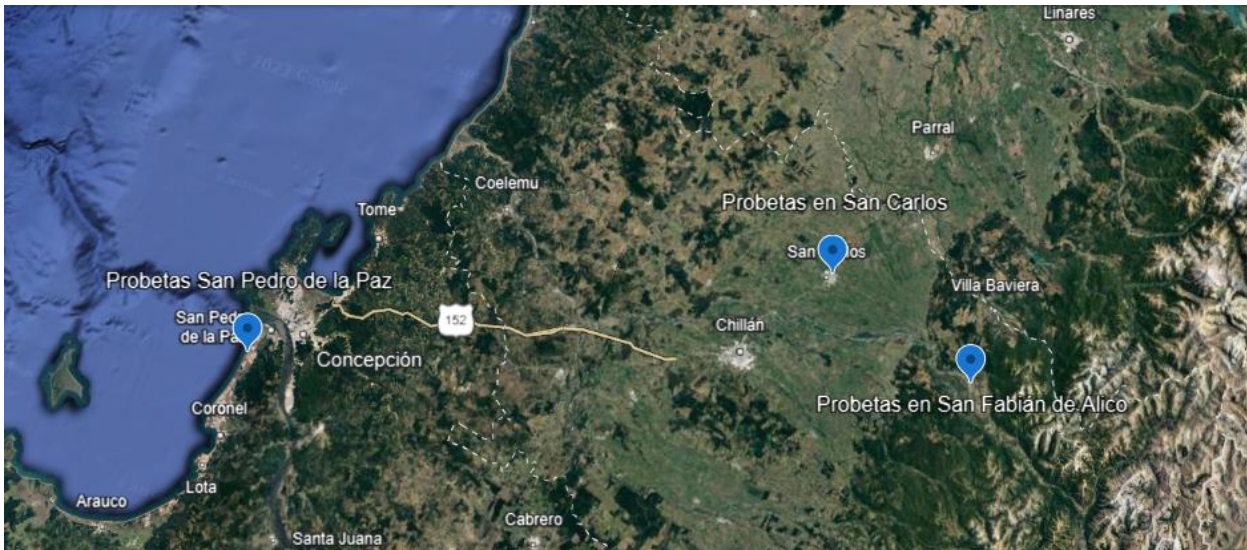


Figura 3: Ubicación geográfica de probetas sometidas a distintas condiciones climáticas.
 Fuente: Elaboración propia.

Transcurridos los 30 días, se registró la información comparativa de las probetas con y sin nanopartículas y se les intervino con los tintes azul de metileno, violeta de pirocatecol, Reactive black 5 y naranja de metilo (Figura 4). Estos se aplicaron en las 4 esquinas de las probetas de San Pedro de la Paz y las probetas de San Carlos para posteriormente tomar registros periódicos durante los próximos 14 días para ver el comportamiento de los tintes con los recubrimientos.

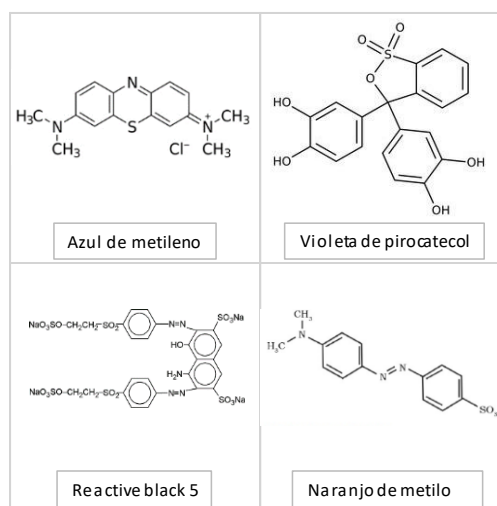


Figura 4: Fórmulas estructurales de los tintes aplicados.
 Fuente: Elaboración propia.

3.4 Sometimiento de probetas a una potencial proliferación de hongos

En este proceso se sometieron 4 probetas, A, B, C y D, mencionadas en el ítem 3.1 (que se utilizaron para establecer las dosificaciones de nanopartículas en la pintura). Estas probetas fueron expuestas a una potencial proliferación de hongos, los cuales con algodón se extrajeron de superficies con un considerable desarrollo de dichos microorganismos. Posteriormente, se reunieron las probetas y los algodones en un entorno controlado que mantuvo una humedad constante, una baja presencia de luminosidad y además se le incorporó una fruta de rápida descomposición con el fin de acelerar el proceso de reproducción de los hongos (Figura 5). Además de eso, se introdujeron varillas de madera sin ningún tipo de recubrimiento como objeto de comparación ante la presencia de hongos.

Se estudió el comportamiento de la proliferación de hongos durante los próximos 30 días corridos.

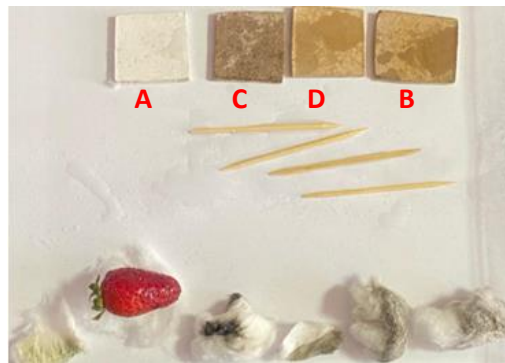


Figura 5: Ambiente controlado para la proliferación de hongos.

(A) Pintura blanca-3 manos, (B) pintura 5% Np-3 manos, (C) pintura 5%Np-1 mano, (D) pintura 2% Np-3 manos

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Probetas sometidas a luz fría constante y proceso de limpieza

Debido a las potenciales propiedades autolimpiantes de las NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$, se designaron 3 probetas (madera, hormigón y fibrocemento) con pintura con nanopartículas y 3 solo con pintura. Tras la aplicación, se dejaron reposar por 7 días corridos para posteriormente ser sometidas a rayados con distintos tipos de lápices de uso cotidiano, los cuales son: destacadador color verde, marcador de pizarra color rojo, lápiz grafito y rotulador de tinta negro. Además, se les agregó tintes color azul de metileno, violeta de pirocatecol, Reactive black 5 y naranja de metilo.

Después de aplicar las intervenciones, las probetas fueron expuestas a luz fría constante durante 3 periodos de hasta 72 horas continuas (Figura 6).

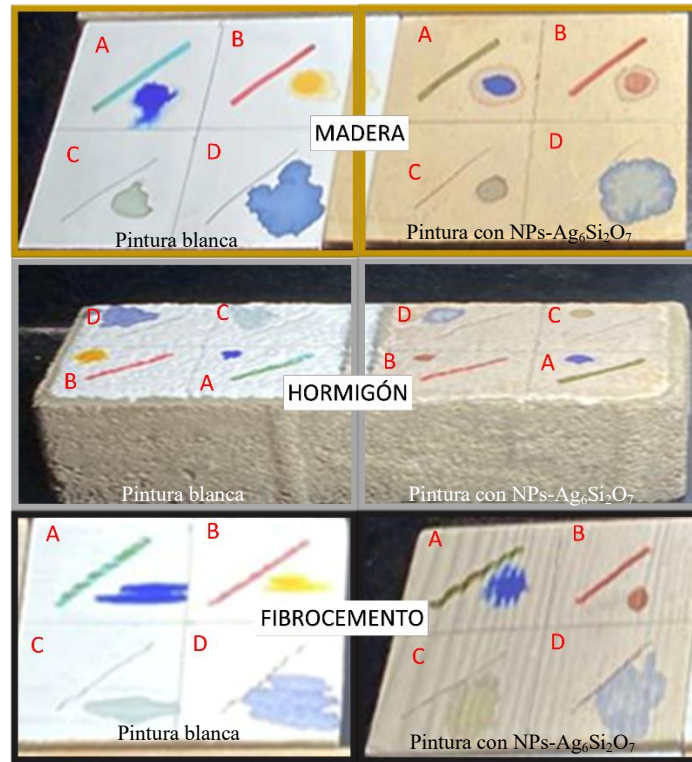


Figura 6: Probetas intervenidas sometidas a luz fría.

A (destacador verde + azul de metileno), B (marcador de pizarra rojo + naranja de metilo), C (lápiz grafito + reactive black 5), D (rotulador de tinta negro + violeta de pirocatecol).

Fuente: Elaboración propia.

Tras pasar los periodos de sometimiento a la luz, se elaboró un protocolo de limpieza suave que consistió en humedecer un paño y frotar con él suavemente durante 60 segundos en cada una de las probetas y así, tomar registro de las similitudes y diferencias que se logran observar en cada una de las probetas. Para realizar comparativas visuales más acertadas, las imágenes fueron sometidas a una herramienta de inteligencia artificial (Claude.ai), la cual estuvo encargada de realizar un protocolo de comparación que se describe a continuación:

1. Analizar las áreas de las probetas antes de la limpieza, identificando los distintos rayados y tintes, detectando las superficies que alcanzan en este instante.
2. Analizar las áreas de las probetas después de la limpieza, identificando los distintos rayados y tintes, detectando las superficies que alcanzan en este instante.
3. Comparar la diferencia de las superficies de rayados y tintes, entregando un porcentaje de degradación.
4. Finalmente, comparar la pintura con y sin NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ antes y después de la limpieza y arrojar un porcentaje de desprendimiento.

Una vez obtenidos los resultados, se crearon tablas comparativas para un mejor análisis.

3.6 Comparación de probetas con y sin nanopartículas frente a la exposición de radiación solar

Las probetas compuestas por fibrocemento, madera y hormigón, tanto aquellas con la adición de NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ como las que carecían de esta adición, fueron expuestas a la radiación solar directa en un día despejado en la ciudad de Concepción. La temperatura ambiente durante la ejecución del estudio se mantuvo constante en 20°C . Utilizando una cámara térmica (Figura 7), se llevaron a cabo mediciones continuas durante un período de 10 minutos en todas las

probetas. Este procedimiento permitió registrar las variaciones térmicas presentes en cada muestra, contribuyendo así a la caracterización del comportamiento de los materiales frente a la exposición solar directa.



Figura 7: Cámara termográfica Fluke Ti400.
Fuente: Elaboración propia.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Síntesis de las NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$

Tras seguir el procedimiento de síntesis establecido por Lou (2014), se observó que las partículas de silicato de plata exhibían tamaños heterogéneos, predominantemente diminutos, como se muestra en la Figura 8. Esto indica que no todas las partículas pueden ser catalogadas como nanopartículas, ya que se identificaron en las muestras partículas que exceden el límite establecido de 100 nm para su clasificación como tales.

Antes de aplicar las NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ a la pintura, se sometieron a un proceso de trituración manual con el objetivo de obtener tamaños homogéneos. Este procedimiento se llevó a cabo para asegurar que las nanopartículas no afectaran adversamente al proceso de pintado.

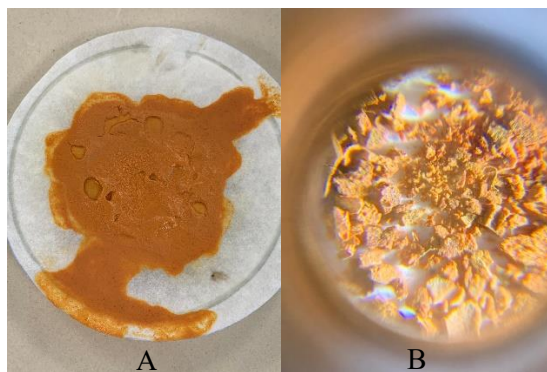


Figura 8: (A) NPs en proceso de secado, (B) NPs post- proceso de secado (acercamiento x60).
Fuente: Elaboración propia.

4.2 Selección de concentración de NPs-Ag₆Si₂O₇ para la aplicación en pintura

Basándonos en comparativas visuales de mezcla y adherencia (ver Tabla 1), se determinó que la concentración óptima para la aplicación en probetas fue del 5% de su masa, utilizando un método de aplicación de tres manos (Probeta B). Esta elección se fundamenta en la observación de que la prolijidad en la pintura destaca en comparación con las demás probetas.

La probeta C, fue descartada por el hecho de que una sola capa de pintura no es capaz de formar un recubrimiento completo en la madera. En el caso de la probeta D, la mixtura y adherencia fueron muy similares a la de la probeta B, pero en el momento en que esta se secó, no presentó mayores diferencias a lo que es la pintura blanca corriente (probeta A).

La probeta E arrojó resultados muy similares a la probeta B; no obstante, al referirnos a la ficha técnica (9), se concluyó que la aplicación de únicamente dos capas de pintura resulta insuficiente para una superficie que no ha sido previamente recubierta. Por lo tanto, se determinó que esta condición no cumple con los criterios establecidos y fue descartada.

Tabla 1. Comparativa de concentración de nanopartículas.

| PROBETAS | CONCENTRACION NANOPARTICULA | MANOS DE PINTURA | x60 |
|---|-----------------------------|------------------|---|
| A  | 0% | 3 |  |
| B  | 5% | 3 |  |
| C  | 5% | 1 |  |
| D  | 2% | 3 |  |
| E  | 5% | 2 |  |

4.3 Análisis DRS

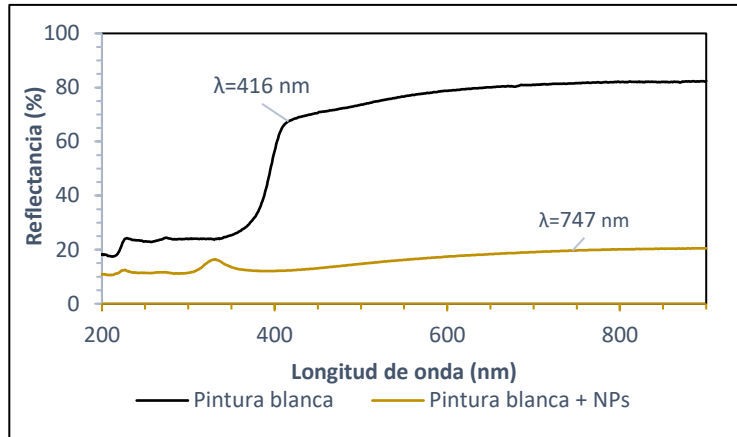


Figura 9: Espectros de reflectancia difusa para pintura blanca y pintura blanca con NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ en fibrocemento. Fuente: Elaboración propia.

Con lo respecta al material fibrocemento, el análisis DRS nos arroja su capacidad de reflectancia en distintas longitudes de onda. Al graficar estos datos (Figura 9) se nos entregan resultados de los cuales se puede inferir que la pintura blanca aplicada tiene un aumento significativo en la reflectancia a una longitud de onda de aproximadamente 416 nm y alcanza su punto máximo aproximadamente a los 750 nm con una reflectancia cercana al 90%. Esto indica que la pintura blanca refleja la mayoría de la luz por sobre los 416 nm, es decir, refleja la luz visible. Por otro lado, la pintura blanca con NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ posee también un aumento en la reflectancia alrededor de los 400 nm, sin embargo, la reflectancia general es mucho menor que la de la pintura blanca, manteniéndose por debajo del 40%. Esto sugiere que la adición de $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ a la pintura blanca reduce su reflectancia, lo que puede indicar que las nanopartículas están absorbiendo más luz.

El band gap de la pintura blanca con NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ en fibrocemento se encuentra a los 747 nm lo que indica que los electrones pueden ser excitados por la luz visible o cualquier radiación con mayor energía. En contraste, la pintura blanca sin aditivos presenta su band gap en el extremo violeta/azul, lo que indica que los electrones pueden ser excitados por la luz en el rango violeta y hacia longitudes de onda más cortas.

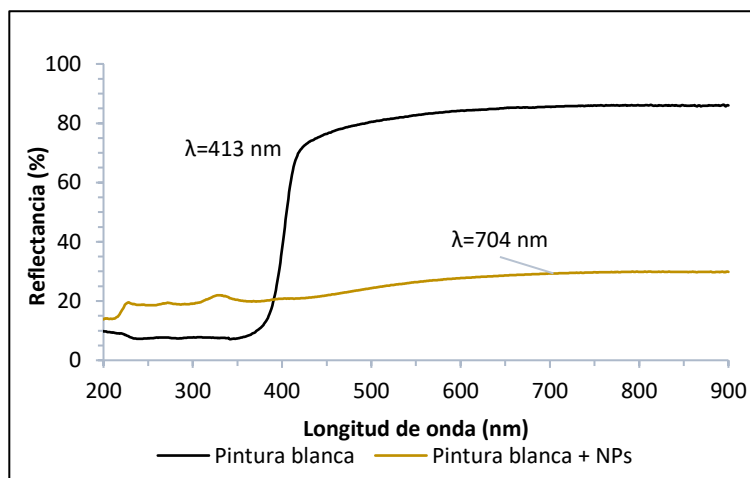


Figura 10: Espectros de reflectancia difusa para pintura blanca y pintura blanca con NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ en madera. Fuente: Elaboración propia.

En la madera, el análisis DRS arroja la reflectancia que posee este material cubierto de pintura blanca con y sin nanopartículas (Figura 10), lo que nos permite inferir que encontramos una situación parecida a la anterior (fibrocemento). En la pintura blanca hay un aumento constante de la reflectancia a partir de los 413 nm, alcanzando una reflectancia cercana al 90% lo que indica que la pintura refleja la mayoría de la luz en estas longitudes de onda. Por otro lado, la pintura blanca con $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ muestra una reflectancia mucho menor, manteniéndose cercana al 30%. Lo que también indica que las nanopartículas están absorbiendo luz.

El band gap de la pintura blanca con NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ en madera se encuentra en los 704 nm, lo que también indica que los electrones pueden ser excitados por la luz visible o cualquier radiación con mayor energía. En contraste, la pintura blanca sin aditivos presenta un band gap en el extremo violeta/azul, lo que indica que los electrones pueden ser excitados por la luz en el rango violeta y hacia longitudes de onda más cortas.

En resumen, la adición de NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ a la pintura blanca parece reducir la reflectancia, sugiriendo que las nanopartículas están contribuyendo a la absorción de luz en comparación a la pintura blanca sin aditivos. Además, los band gaps indican que los electrones pueden ser excitados por la luz visible o radiación con mayor energía en ambos materiales.

4.4 Desempeño de las pinturas con y sin NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ bajo distintas condiciones climáticas

Desde los primeros minutos de aplicación de los recubrimientos con y sin nanopartículas, se observaron diferencias en sus tonalidades (Figura 11). Las probetas con recubrimiento de nanopartículas adquirieron un tono grisáceo, distanciándose del blanco perfecto de las probetas convencionales.

Las probetas con mayor diferencia entre ellas fueron las probetas de madera con nanopartículas (MN). Estas pueden ser debido a una diferencia entre las mezclas en la preparación del recubrimiento. Esto alude a la posibilidad de que las nanopartículas hayan experimentado un proceso de decantación dentro del recipiente donde se preparó la pintura, diferenciando así, las probetas que se pintaron primero que otras.

Transcurridos los 30 días desde la aplicación de los recubrimientos con y sin nanopartículas sobre los materiales hormigón, madera y fibrocemento, se presentaron nuevamente variaciones en las tonalidades, intensificando aún más el tono gris del recubrimiento modificado en cada uno de los distintos materiales. En cambio, las probetas sin nanopartículas mantuvieron su tonalidad blanca, pero si perdiendo un poco su intensidad. Estos cambios se aprecian en la Tabla 2.

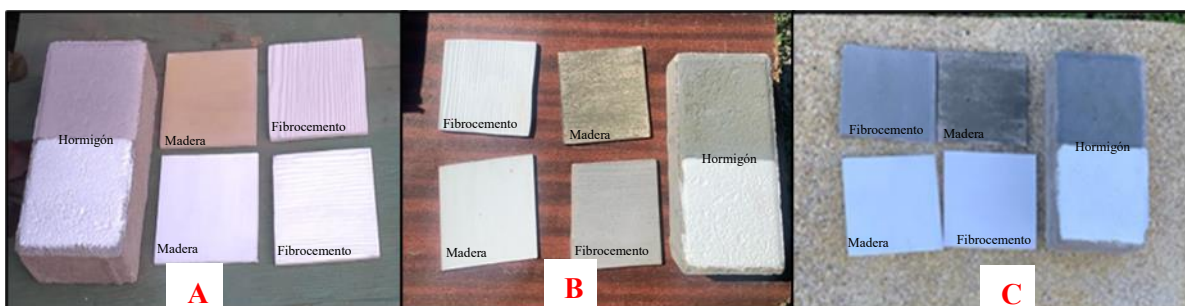
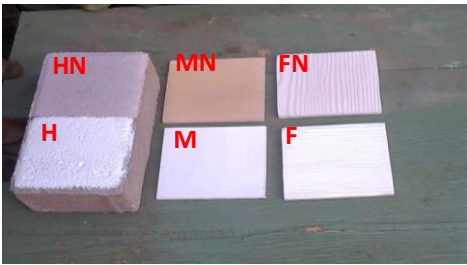
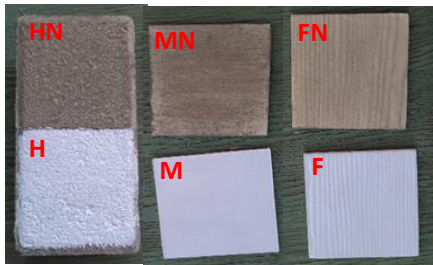
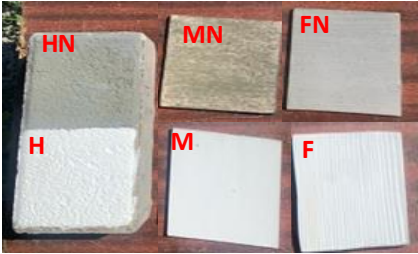
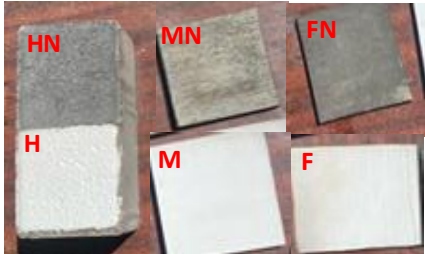
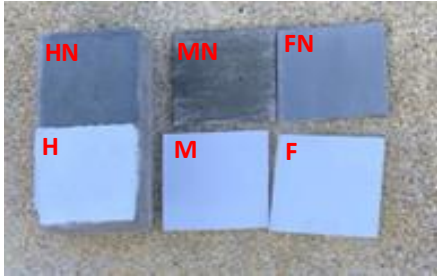
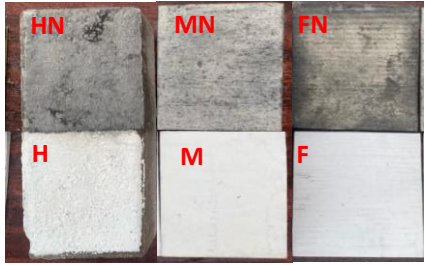


Figura 11: Probetas día 01 en San Pedro de la Paz (A), San Carlos (B) y San Fabián (C).
 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2: Comparación del paso del tiempo en distintas condiciones climáticas.

| UBICACIÓN | Día 01 | Día 30 |
|---------------------|--|--|
| SAN PEDRO DE LA PAZ |  |  |
| SAN CARLOS |  |  |
| SAN FABIÁN DE ALICO |  |  |

(HN) Hormigón con nanopartículas, (H) Hormigón sin nanopartículas, (MN) Madera con nanopartículas, (M) Madera sin nanopartículas, (FN) Fibrocemento con nanopartículas, (F) Fibrocemento sin nanopartículas.

La cantidad de radiación absorbida por las probetas tiene un impacto directo en aquellas que fueron recubiertas con NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$. Este resultado era previsible gracias al análisis DRS previamente realizado. Por consiguiente, es relevante señalar que las probetas ubicadas en San Carlos y San Fabián mostrarían mayores disparidades en sus tonalidades, ya que estas áreas geográficas exhiben un índice de radiación más elevado, atribuible a su mayor altitud, así como a un menor índice de nubosidad. Estos cambios ocurren principalmente por la oxidación que presentan las moléculas de plata presentes en las nanopartículas, proceso químico que ocurre cuando la plata entra en contacto con el aire, el agua y ciertas sustancias, tomando un tono más oscuro (13).

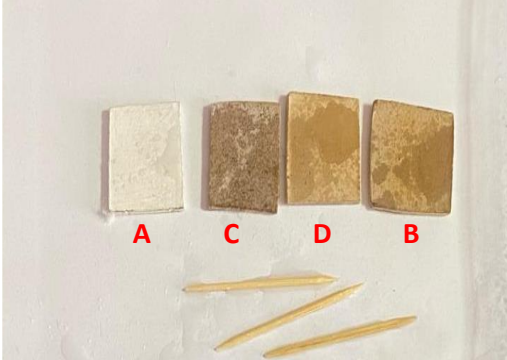
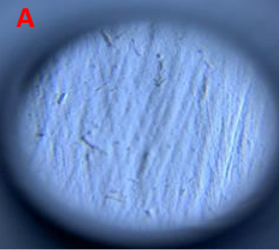
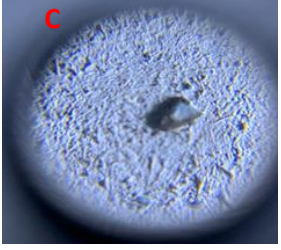
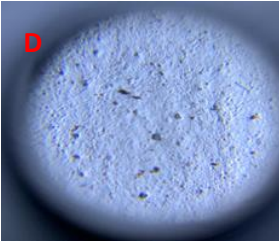
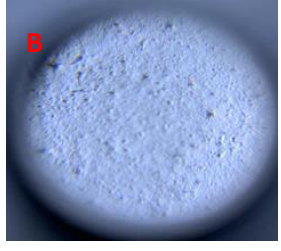
La disparidad observada entre las probetas ubicadas en diversas localidades puede también estar directamente relacionada con las condiciones climáticas a las que fueron expuestas, como se detalla en el Anexo A. A pesar de la proximidad geográfica de estas localidades, factores como la humedad relativa, temperatura e incluso la salinidad del entorno podrían haber ejercido influencia en los resultados.

4.5 Sometimiento de probetas a una potencial proliferación de hongos

La proliferación de hongos en un ambiente controlado se concretó con éxito. La constante adición de humedad y la casi nula presencia de luz, aportó al rápido desarrollo de microorganismos.


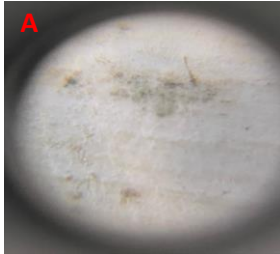
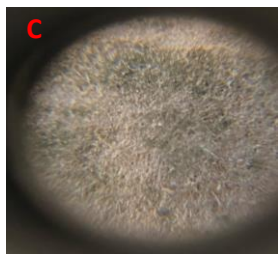
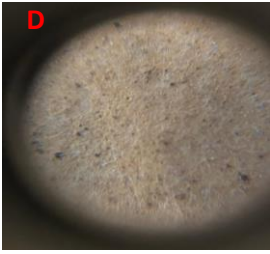
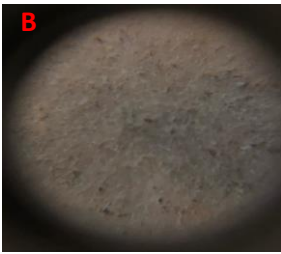
La pintura al agua, dentro de sus propiedades contiene la particularidad de ser antihongos (8). En la Tabla 3 y Tabla 4 se muestran los resultados previos y posteriores respectivamente a la incubación de hongos en un ambiente controlado.

Tabla 3: Día inicial de la incubación de hongos.

| Día 01 | x60 Día 01 | |
|---|---|--|
|  |  |  |
| |  |  |

(A) Pintura blanca-3 manos, (B) pintura 5% Np-3 manos, (C) pintura 5%Np-1 mano, (D) pintura 2% Np-3 manos.

Tabla 4: Día 30 desde la incubación de hongos.

| Día 30 | x60 Día 30 | |
|---|--|---|
|  |  |  |
| |  |  |

(A) Pintura blanca-3 manos, (B) pintura 5% Np-3 manos, (C) pintura 5%Np-1 mano, (D) pintura 2% Np-3 manos.



Las superficies con mayor notoriedad de proliferación de hongos son las probetas A y C. En cuanto a la probeta A, puede deberse a que la pintura blanca pese a ser antihongos no presenta una alta concentración de agentes biocidas y en cuanto a la probeta C que contiene NPs-Ag₆Si₂O₇, la cantidad de pintura aplicada fue solo de una mano, lo cual puede ser insuficiente para impedir el crecimiento de microorganismos.

Las probetas que mejor se comportaron ante la potencial proliferación de hongos fueron las probetas B y D, ambas contienen una cantidad similar de NPs-Ag₆Si₂O₇, las cuales pudieron potenciar las propiedades antifúngicas que presenta la pintura, aun pese a estar sometidas a un ambiente donde la presencia lumínica, la mayor parte del tiempo, fue nula.

En términos generales, las probetas con presencia de nanopartículas se comportaron mejor que la pintura blanca, lo que presuntamente indica que la inhibición del ataque fúngico es mayor ante la presencia de NPs-Ag₆Si₂O₇. Un estudio del 2014 que avala lo mencionado anteriormente, menciona que la actividad antifúngica de nanopartículas que contienen plata actúa liberando iones de plata en el interior de los microorganismos, atacando directamente el ciclo de la cadena respiratoria y propiciando la muerte microbiana (14).

Recordemos que además de las probetas, se agregaron varillas de madera sin ningún tipo de recubrimiento, estas fueron completamente penetradas por los hongos, pasando de un tono café claro a un tono muy cercano al negro (Tabla 5). Esto confirma aún más que el ambiente controlado para la proliferación de hongos fue un éxito y, además, indica que los recubrimientos protegen en demasía la sobrepenetración de estos mismos.

Tabla 5: Varillas sin recubrimiento sometidas a una proliferación de hongos.

| Día 01 | Día 30 |
|---|--|
|  |  |

4.6 Efectos de luz fría constante y proceso de limpieza

Después de la exposición a luz fría durante el periodo establecido, no se evidenciaron cambios significativos en las probetas en términos de eliminación de rayados y tintes aplicados (Anexo B). Esta falta de respuesta podría atribuirse tanto a la insuficiencia de la radiación emitida por el foco LED, falta de humedad en el sistema, como también al tiempo limitado en el que se llevó a cabo este estudio.

Posteriormente, se realizó el proceso de limpieza con el protocolo acordado, los cambios fueron registrados en las Figuras 12, 13 y 14, junto a sus tablas comparativas (Tabla 6, 7 y 8). Se registraron los datos de desprendimiento de pintura con una tonalidad roja cuantificando el porcentaje de pintura que se perdió durante la limpieza, destacándolo como una arista negativa en esta investigación. Mientras que, con una tonalidad azul, se registró el porcentaje perteneciente a la presencia de rayas y tintes posterior a la limpieza.

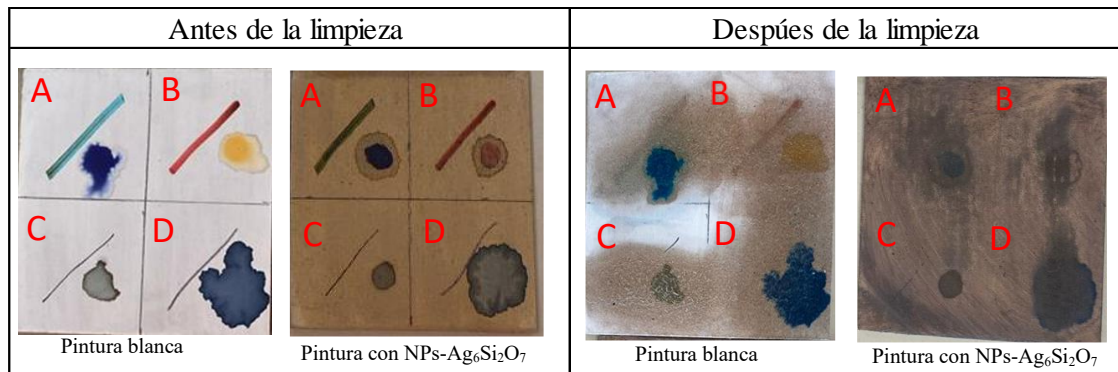


Figura 12: Probetas de madera antes y después de la limpieza, A (destacador verde + azul de metileno), B (marcador de pizarra rojo + naranja de metilo), C (lápiz grafito + reactive black 5), D (rotulador de tinta negro + violeta de pirocatecol).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6: Comparativa post-protocolo de limpieza en probetas de madera.

| MADERA | Pintura blanca | Pintura con NPs-Ag6Si2O7 |
|---|----------------|--------------------------|
| Desprendimiento de pintura | 70% | 58% |
| Presencia de destacador verde (A) | 60% | 85% |
| Presencia de azul de metileno (A) | 5% | 24% |
| Presencia de marcador de pizarra | 65% | 80% |
| Presencia de naranja de metilo (B) | 42% | 75% |
| Presencia de lápiz grafito (C) | 75% | 54% |
| Presencia de reactive black 5 (C) | 30% | 5% |
| Presencia de rotulador negro (D) | 100% | 100% |
| Presencia de violeta de pirocatecol (D) | 23% | 5% |

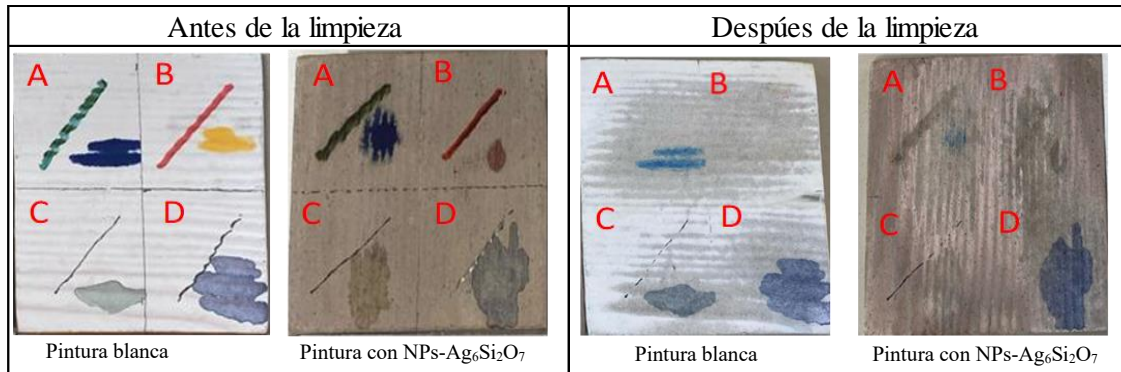


Figura 13: Probetas de fibrocemento antes y después de la limpieza A (destacador verde + azul de metileno), B (marcador de pizarra rojo + naranja de metilo), C (lápiz grafito + reactive black 5), D (rotulador de tinta negro + violeta de pirocatecol).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7: Comparativa post-protocolo de limpieza en probetas de fibrocemento.

| FIBROCEMENTO | Pintura blanca | Pintura con NPs-Ag6Si2O7 |
|---|----------------|--------------------------|
| Desprendimiento de pintura | 50% | 25% |
| Presencia de destacador verde (A) | 100% | 45% |
| Presencia de azul de metileno (A) | 67% | 83% |
| Presencia de marcador de pizarra | 100% | 80% |
| Presencia de naranja de metilo (B) | 95% | 60% |
| Presencia de lápiz grafito (C) | 20% | 20% |
| Presencia de reactive black 5 (C) | 0% | 85% |
| Presencia de rotulador negro (D) | 100% | 90% |
| Presencia de violeta de pirocatecol (D) | 15% | 0% |

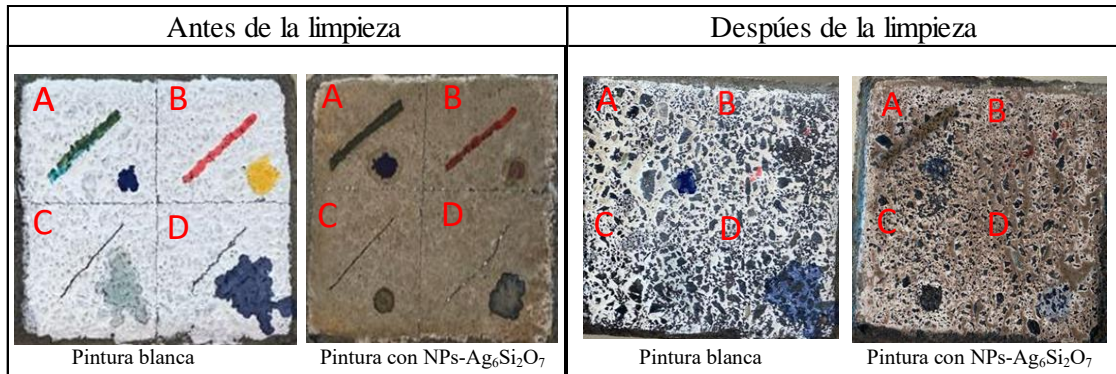


Figura 14: Probetas de hormigón antes y después de la limpieza A (destacador verde + azul de metileno), B (marcador de pizarra rojo + naranja de metilo), C (lápiz grafito + reactive black 5), D (rotulador de tinta negro + violeta de pirocatecol).
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8: Comparativa post-protocolo de limpieza en probetas de hormigón.

| HORMIGÓN | Pintura blanca | Pintura con NPs-Ag6Si2O7 |
|---|----------------|--------------------------|
| Desprendimiento de pintura | 40% | 20% |
| Presencia de destacador verde (A) | 83% | 60% |
| Presencia de azul de metileno (A) | 20% | 50% |
| Presencia de marcador de pizarra | 83% | 75% |
| Presencia de naranja de metilo (B) | 90% | 67% |
| Presencia de lápiz grafito (C) | 33% | 75% |
| Presencia de reactive black 5 (C) | 60% | 33% |
| Presencia de rotulador negro (D) | 71% | 80% |
| Presencia de violeta de pirocatecol (D) | 83% | 68% |

Para comentar el desempeño de las pinturas con y sin nanopartículas en cuanto al desprendimiento de esta tras el proceso de limpieza, se creó una gráfica resumen para analizar ciertos parámetros que pudiesen revelar alguna diferencia distintiva entre probetas de un mismo material, pero con distinto recubrimiento (Figura 15).

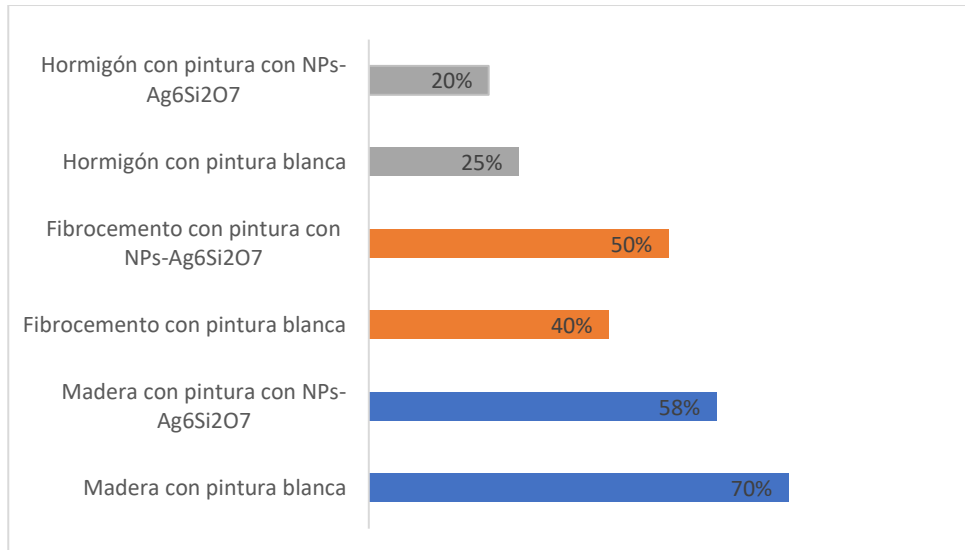


Figura 15: Resumen de desprendimiento de pintura en las probetas tras limpieza.
 Fuente: Elaboración propia.

Al no observar tendencias ni diferencias notorias en cuanto al desprendimiento, no es posible atribuir mejoras en la adherencia de la pintura con nanopartículas.

En relación al desempeño de la pintura blanca y la pintura con NPs-Ag₆Si₂O₇ en la remoción de rayaduras y tintes posterior al proceso de limpieza, se creó una grafica resumen, cuantificando la presencia de estas intervenciones, como muestra la figura 16 (datos obtenidos de las tablas 6,7 y 8).

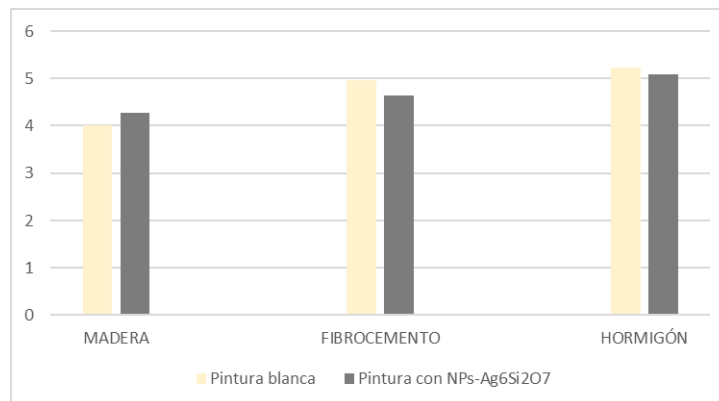


Figura 16: Resumen de presencia de tintes y rayas en las probetas tras limpieza.
 Fuente: Elaboración propia.

Las NPs-Ag₆Si₂O₇ y su capacidad para funcionar como catalizadores en procesos de degradación, como la fotocatalisis, no se manifestaron completamente en esta fase del experimento. La expectativa era que los contaminantes pudieran ser eliminados con mayor facilidad, logrando así diferencias significativas entre las probetas con y sin nanopartículas. Diferencias que no se logran apreciar en la anterior gráfica, mostrando desempeños muy similares entre probetas.

4.7 Probetas sometidas a radiación solar

En términos generales, las probetas recubiertas con pintura que contenían NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ demostraron un notable incremento en la absorción de radiación solar (registrado con cámara termográfica, Figura 17), resultando en temperaturas alcanzadas significativamente superiores (Tablas 9, 10 y 11).

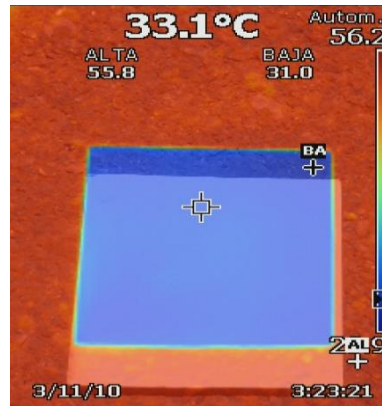


Figura 17: Registro de cámara termográfica en probeta con nanopartículas (madera).
 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9: Probetas de hormigón sometidas a radiación solar.

| HORMIGÓN | Pintura Blanca | Pintura con NPs |
|-----------------|------------------|------------------|
| Tiempo (min) | Temperatura (°C) | Temperatura (°C) |
| 0 | 22,6 | 24,1 |
| 5 | 23,4 | 26 |
| 10 | 25,4 | 28,5 |

Tabla 10: Probetas de fibrocemento sometidas a radiación solar.

| FIBROCEMENTO | Pintura Blanca | Pintura con NPs |
|---------------------|------------------|------------------|
| Tiempo (min) | Temperatura (°C) | Temperatura (°C) |
| 0 | 36,1 | 36,7 |
| 5 | 38,9 | 45 |
| 10 | 41,3 | 48,9 |

Tabla 11: Probetas de madera sometidas a radiación solar.

| MADERA | Pintura Blanca | Pintura con NPs |
|---------------|------------------|------------------|
| Tiempo (min) | Temperatura (°C) | Temperatura (°C) |
| 0 | 33,1 | 38,8 |
| 5 | 35 | 40,1 |
| 10 | 38,1 | 46 |

Estudios desarrollados abalan los resultados de esta investigación, expresando empíricamente que las nanopartículas que contienen oro, plata, cobre y oxido de grafeno alcanzan una temperatura de equilibrio de 5°C superior al fluido base al ser sometidos a radiación solar (15).

Las probetas de hormigón exhibieron la menor disparidad en las variaciones de temperatura. Este fenómeno podría atribuirse a su alta inercia térmica (16), lo que significa que es capaz de almacenar grandes cantidades de calor antes de cambiar su temperatura.

Gracias a estas diferencias de $+3^{\circ}\text{C}$ en el hormigón, $+7^{\circ}\text{C}$ en el fibrocemento y $+8^{\circ}\text{C}$ en la madera sería correcto atribuir propiedades térmicas a la pintura con NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ aplicadas en estas superficies, lo que abre camino a la posterior aplicación de esta pintura con fines de mejoramiento de la eficiencia energética en distintos tipos de obras civiles.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Seguido el protocolo de síntesis de nanopartículas no es posible asegurar en un cien por ciento la presencia de NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$. Por esta razón, es recomendable realizar un análisis SEM (microscopía electrónica de barrido) para obtener imágenes detalladas de la morfología y composición de la superficie de las muestras a una escala submicroscópica.

El sometimiento de probetas a diversas condiciones climáticas del centro-sur de Chile proporcionó información crucial sobre el cambio de color que experimenta la pintura con nanopartículas ante la exposición a diferentes factores climáticos presentes en estas áreas. Este aspecto adquiere gran relevancia, ya que al aplicar pinturas en superficies, el color se convierte en un criterio fundamental al elegir el recubrimiento. Por lo tanto, el cambio de color observado puede considerarse un inconveniente significativo, lo que potencialmente limitaría su aplicabilidad en ciertas situaciones. Sin embargo, podría ser utilizado en pinturas de colores más oscuros.

La penetración de hongos en superficies recubiertas con pintura representa un desafío, y de acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, la pintura con NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ muestra mejoras sustanciales en el control de microorganismos. Sin embargo, es esencial investigar cómo se comporta la pintura con nanopartículas al aplicarse en otros tipos de superficies. Además, se debe analizar el desempeño de la pintura a lo largo de su vida útil para comprender completamente su efectividad a lo largo del tiempo.

En relación con las propiedades autolimpiantes que debieron exhibir las NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$, es crucial profundizar más en este tema, dado que esta investigación se desarrolló con un margen de tiempo acotado. Se sugiere que futuras investigaciones extiendan la excitación de las propiedades fotocatalíticas durante periodos más extensos y se empleen radiaciones de distintas longitudes de onda. Esto permitiría una comprensión más completa y detallada de las capacidades autolimpiantes de las nanopartículas en diversas condiciones experimentales.

La pintura con NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ presentó notables aumentos en la temperatura de las probetas frente a la exposición directa de radiación solar. Este fenómeno sugiere fuertemente la contribución de propiedades térmicas a la superficie a la cual la pintura está adherida. Este hallazgo abre nuevas posibilidades de investigación con el objetivo de explorar aplicaciones en el campo civil para potenciar, mejorar y conferir características significativas a distintos materiales.

En conjunto con esta investigación, se llevó a cabo una metodología similar utilizando pintura al óleo. Los resultados obtenidos en dicho estudio exhibieron similitudes, pero también revelaron diferencias notables.

- ✓ Entre las similitudes, se destacó la ausencia de propiedades autolimpiantes. Además, el protocolo de limpieza no evidenció cambios distintivos para cada tipo de probeta. Por otro lado, se observó que las nanopartículas contribuyeron a propiedades térmicas de las probetas mediante la absorción de radiación solar.
- ✓ Las discrepancias que presentan ambos estudios están principalmente en sus tonalidades, eficacia de los agentes biocidas y en sus reflectancias.
 - Las tonalidades que toman las nanopartículas en el óleo se acercan más a un tono blanco hueso, alejándose de los tonos grises oscuros obtenidos en la presente investigación.



- En cuanto a la eficacia contra la proliferación de hongos, la infestación en las probetas con pintura al óleo con NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ fue mucho mayor, penetrando incluso de igual manera probetas con y sin nanopartículas.
- Finalmente, las diferencias en sus reflectancias, particularmente en las probetas de fibrocemento, poseen un porcentaje de reflectancia del 55 % en el caso del óleo con NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$, mucho mayor que el 20% en el caso de la pintura blanca al agua con nanopartículas. Incluso, la reflectancia del óleo con nanopartículas supera la de la pintura blanca al óleo sin aditivos.

En términos generales, la pintura modificada presenta mejoras atribuibles a las NPs- $\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7$, la eficacia de las propiedades que aporta en la pintura dependerá siempre del entorno y uso que se le quiera dar.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se llevó a cabo gracias al financiamiento de proyecto ANID FONDECYT de Iniciación N°11230671.

7. REFERENCIAS

1. **Colombini, A. (2018).** The duality of Graffiti: is it vandalism or art? *CeROArt, HS*.
<https://doi.org/10.4000/ceroart.5745>
2. **Nanotechnologies. (s/f). Europa.eu. Recuperado el 16 de diciembre de 2023,** de
https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/en/nanotechnologies/1-2/1-introduction.htm
3. **Granados, A., & Andreé, P. (2016).** Síntesis y caracterización de nanopartículas de óxido de zinc obtenidas por el método de precipitación para su aplicación en pintura esmalte comercial. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
4. **Barberia, R. L., Bellotti, N., & Viera, M. R. (2019).** Pinturas de base acuosa aditivadas con nanopartículas de plata para prevenir la formación de biopelículas. *Investigación Joven*, 6(Especial), 178–178.
<https://revistas.unlp.edu.ar/InvJov/article/view/7101>
5. **México, P. F. (2020, junio 11).** *Nanosílice funcionalizada como aditivo antimicrobiano para pinturas a base de agua*. Products Finishing México. <https://www.pf-mex.com/noticias/post/nanosilice-funcionalizada-como-aditivo-antimicrobiano-para-pinturas-a-base-de-agua>
6. **Wang, T., Stadler, F. J., Husein, D. Z., Zhang, D., Cai, J., Wang, Y., Li, M., Qiang, Y., & Zheng, J. (2022).** Comparative study of enhanced adsorption-photodegradation activity using activated biochar composited with Ag₃PO₄ or Ag₆Si₂O₇ in wastewater treatment and disinfection: Effects and mechanisms. *Colloids and Surfaces. A, Physicochemical and Engineering Aspects*, 655(130235), 130235.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130235>
7. **Lou, Z., Huang, B., Wang, Z., Ma, X., Zhang, R., Zhang, X., Qin, X., Dai, Y., & Whangbo, M.-H. (2014).** Ag₆Si₂O₇: A silicate photocatalyst for the visible region. *Chemistry of Materials: A Publication of the American Chemical Society*, 26(13), 3873–3875. <https://doi.org/10.1021/cm500657n>
8. **Feizpoor, S., Habibi-Yangjeh, A., Seifzadeh, D., & Ghosh, S. (2020).** Combining carbon dots and Ag₆Si₂O₇ nanoparticles with TiO₂: Visible-light-driven photocatalysts with efficient performance for removal of pollutants. *Separation and Purification Technology*, 248(116928), 116928.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116928>
9. **Fisico-Químicos, P. (s/f). Rápido Listo uso Económico Acción antihongo Secado. Shopify.com. Recuperado el 25 de noviembre de 2023,** de
https://cdn.shopify.com/s/files/1/0623/6821/9324/files/FT_Latex_Blanco_rev.2023.pdf?v=1687278651
10. **Chelazzi, D., Poggi, G., Jaidar, Y., Toccafondi, N., Giorgi, R., & Baglioni, P. (2013).** Hydroxide nanoparticles for cultural heritage: Consolidation and protection of wall paintings and carbonate materials. *Journal of Colloid and Interface Science*, 392, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.09.069>
11. **Connor, N. (2021, septiembre 2).** ¿Qué es Band Gap - Brecha de energía en semiconductores - Definición. *Material Properties*. <https://material-properties.org/es/que-es-band-gap-brecha-de-energia-en-semiconductores-definicion/>

12. **Fotocatálisis. (s/f). Laguia2000.com. Recuperado el 22 de diciembre de 2023, de** <https://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/fotocatalisis>
13. **López Iturbe, J., Vilchis Nestor, A. R., Sánchez Mendieta, V., & Avalos Borja, M. (2013).** Obtención y caracterización de nanopartículas de plata soportadas en fibra de algodón. *Superficies y vacío*, 26(3), 73–78. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-35212013000300001
14. **Acevedo-Contreras, A., Acosta-Torres, L. S., Morales- Zavala, C. A., & Castaño Meneses, V. M. (2014).** Citotoxicidad y efecto antifúngico de nanopartículas de plata para uso de odontológico. *Mundo Nano Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, 5(9), 68–76. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2012.9.45235>
15. **Andrés, C., & Leyton, C. (s/f). EFECTO DE DISTINTOS NANOFLUIDOS EN LA ABSORCIÓN DE RADIACIÓN SOLAR. Uchile.cl. Recuperado el 2 de enero de 2024, de** <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/151584/Efecto-de-distintos-nanofluidos-en-la-absorcion-de-radiacion-solar.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
16. **Medina, M., Kaiser, E., López, R., Domizio, C., & Tecnológico, I. (s/f). Use of concrete thermal inertia for buildings energy savings. Amelica.org. Recuperado el 26 de diciembre de 2023, de** <http://portal.amelica.org/ameli/journal/266/2662024006/2662024006.pdf>



ANEXOS

A) Condiciones climáticas a las que se sometieron las probetas

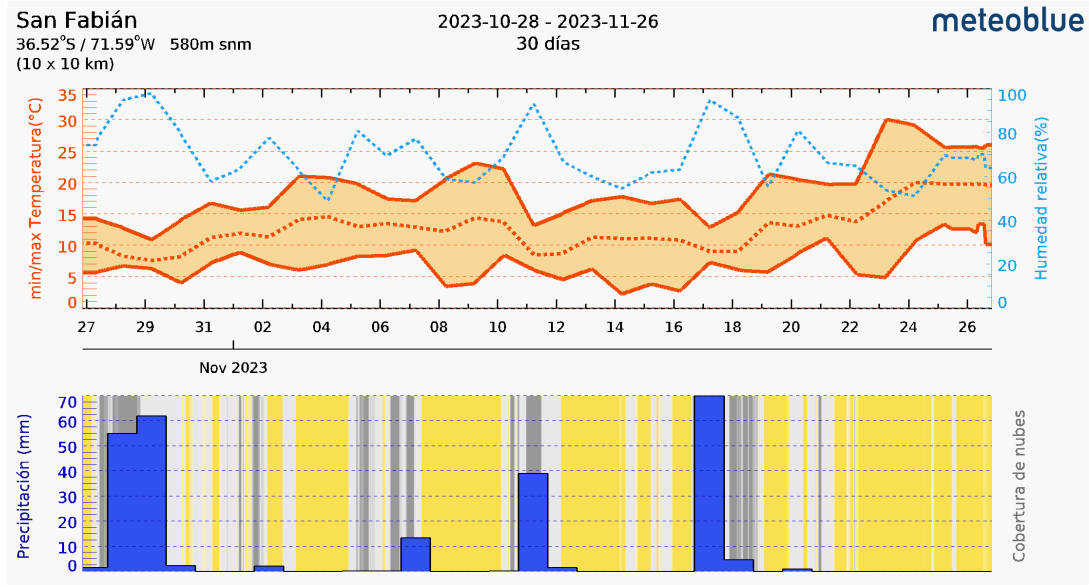


Figura A: Gráficos de precipitaciones, temperaturas y humedades relativas de San Fabián de Alico.
Fuente: Meteoblue.

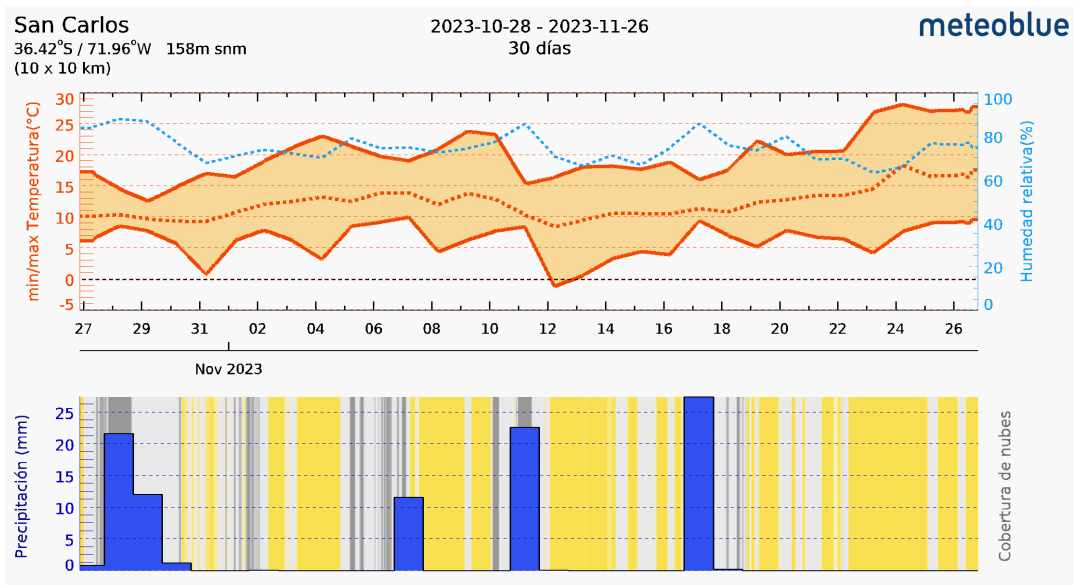


Figura B: Gráficos de precipitaciones, temperaturas y humedades relativas de San Carlos.
Fuente: Meteoblue.

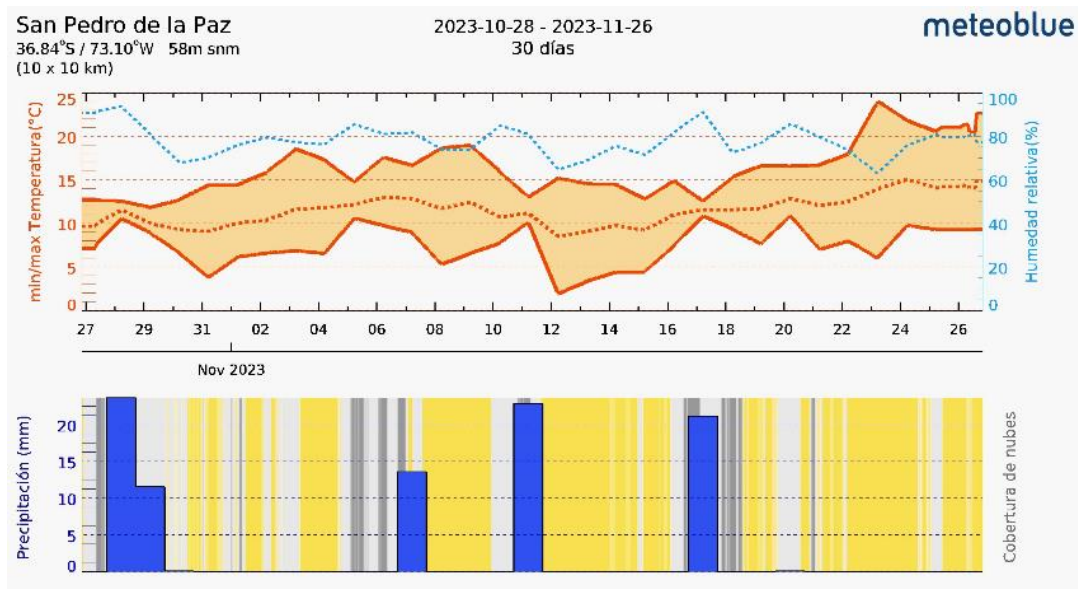


Figura C: Gráficos de precipitaciones, temperaturas y humedades relativas de San Pedro de la Paz.
Fuente: Meteoblue.

B) Efectos de luz fría constante

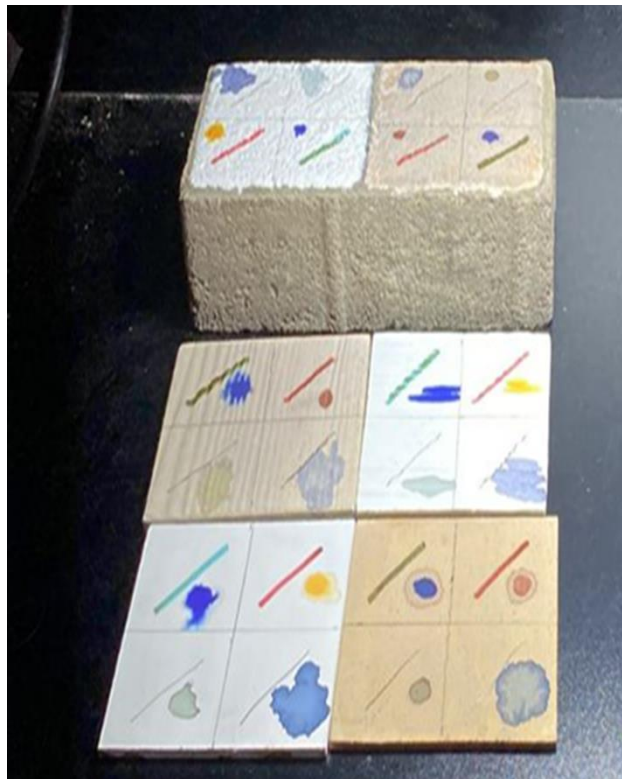


Figura D: Probetas comenzando sometimiento a periodos de luz fría.
Fuente: Elaboración propia



Figura E: Probetas finalizando el sometimiento a periodos de luz fría.
Fuente: Elaboración propia