

ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO POR MEDIO DE ANÁLISIS DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES

**Camilo Hernández Macías
Alberto Rafael Pérez Oñate**

Trabajo de grado para optar al título de pregrado

Dr. Ing ENGELBERTH SOTO ESTRADA



**UNIVERSIDAD EIA
INGENIERÍA CIVIL
ENVIGADO
2018**

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Este trabajo está dedicado a nuestras familias que nos apoyaron desde el inicio de nuestra carrera universitaria con su colaboración y por ser un soporte en los momentos en los que sentíamos que no podíamos con la carga académica.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

AGRADECIMIENTOS

Queremos darles un especial agradecimiento a nuestros padres por su constante apoyo en nuestra formación tanto académica como personal. Ha sido un camino difícil que sin su apoyo no hubiésemos podido recorrer

A nuestro directo Engelberth Soto por su acompañamiento constante, dedicación y compromiso con este trabajo. Sin su apoyo no hubiera alcanzado los resultados que se obtuvieron.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. PRELIMINARES.....	14
1.1 Planteamiento del problema	14
1.2 Objetivos del proyecto	16
1.2.1 Objetivo General	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
1.3 Marco de referencia.....	16
1.3.1 Antecedentes	16
1.3.2 Conceptos	18
1.3.3 Métodos de ensayo	21
Prueba de resistencia a la penetración:	23
Prueba de la extracción o Pull – Out:	24
Prueba del martillo de rebote:	26
Velocidad de pulsos ultrasónicos:	26
Cilindros de hormigón moldeados in situ:.....	27
1.4 MARCO METODOLÓGICO.....	28
1.4.1 Variables que influyen en la resistencia a la compresión del concreto 28	
1.4.2 Técnica de inspección no destructiva usada en el desarrollo experimental.....	32
1.4.3 Análisis de relación entre variables.....	33

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2. METODOLOGÍA.....	35
2.1 Etapa 1: DEFINICIÓN DE VARIABLES.....	35
2.1.1 Identificar las variables claves que afectan el diseño de mezcla	35
2.1.2 Definir el tamaño de muestra de los especímenes sujetos a estudio.	35
2.2 Etapa 2: construcción de la firma espectral.	36
2.2.1 Elementos conservación de muestras y control de condiciones	36
2.2.2 Registro fotográfico	36
2.2.3 Procesamiento de la información espectral.....	36
2.2.4 Construcción de la firma espectral	36
2.3 Etapa 3: VALIDACIÓN DEL MÉTODO	37
2.3.1 Validación del método por medio de la comparación con la resistencia del concreto obtenida por ensayos tradicionales.....	37
3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	38
3.1 Experimento preliminar	38
3.2 Preparación del experimento	43
3.2.1 Diseño de la mezcla	43
3.2.2 Preservación de las muestras de concreto	45
3.2.3 Número de muestras de concreto	47
3.3 Construcción de la firma espectral.....	49
3.3.1 Adquisición de imágenes	49
3.4 Procesamiento de imágenes	53
3.4.1 Extracción de datos.....	53

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.4.2	Convertir de entero a flotante.....	55
3.4.3	Estimación de la reflectancia.....	56
3.4.4	Extracción de información para análisis estadístico.....	58
3.5	Convertir a archivos de Excel.....	60
3.6	Procesamiento de la información.....	61
3.7	Ensayos de compresión de los cilindros de concreto.....	67
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	70
5.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES.....	73
9.	RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES.....	74
	REFERENCIAS.....	76

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1 Factor de corrección de resistencia de acuerdo con la relación L/D.....	23
Tabla 2.Causas en variabilidad del concreto (Materiales).	29
Tabla 3. Causas en variabilidad del concreto (Dosificación y Mezclado).....	30
Tabla 4. Causas en variabilidad del concreto (Ensayo)	31
Tabla 5. Numero de imágenes tomadas por muestras	52

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Espectro Electromagnético.....	19
Figura 2 a. Reflexión b. Absorción c. Transmisión.....	20
Figura 3 Ensayo de rotura o compresión simple.....	22
Figura 4 Ensayo de extracción de núcleos	22
Figura 5. Penetrómetro digital.....	23
Figura 6. Prueba de la extracción o Pull – Out.....	24
Figura 7. Ensayos Esclerómetros	25
Figura 8. Ensayo de martillo rebote	26
Figura 9. Ensayo de velocidad de pulsos ultrasónicos	27
Figura 10.Cilindros de hormigón moldeados en el lugar.....	28
Figura 11.Imagen multiespectral (izquierda). Imagen hiperespectral (derecha)	32
Figura 12.Ubicación de muestras de concreto en el laboratorio de estructuras afuera (izquierda) adentro (derecha).....	38
Figura 13. Falla de cilindros de concreto.	39
Figura 14. Banda Green, Relación A/C =0,5.....	40
Figura 15. Banda Red, Relación A/C = 0,5	40
Figura 16.Banda Green, Relación A/C = 0,55.....	41
Figura 17.Banda Red, Relación A/C=0,55.....	41
Figura 18 Formaletas para la elaboración de muestras.....	44
Figura 19.Elaboración de las muestras de concreto	44
Figura 20.Cajas de acrílico para la preservación de las muestras de concreto	45

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Figura 21. Diseño de cajas herméticas, pruebas iniciales.	46
Figura 22. Diseño de cajas de acrílico	47
Figura 23. Cajas de Acrílicos	47
Figura 24 Cámara multiespectral	49
Figura 25. Modelo en AutoCAD de la base de la cámara. Medidas en mm.....	50
Figura 26. Base iluminada de MDF para la toma de imágenes	51
Figura 27. Toma de fotografías.....	52
Figura 28. Conversión de Formatos en PixelWrench2.....	54
Figura 29. Modelo para convertir la información a formato flotante.	55
Figura 30. Operación para estimar los valores de reflectancia	56
Figura 31. Macro para cambiar de escala.....	57
Figura 32. Muestra de concreto con sus respectivos valores de reflectancia	58
Figura 33. Puntos de extracción de reflectancia	59
Figura 34. Modelo para la extracción de puntos	60
Figura 35. Modelo para pasar los puntos a archivos de Excel.....	60
Figura 36. Distribución espacial de los valores de reflectancia de una muestra de concreto, banda Green	62
Figura 37. Valores promedio e intervalo de confianza al 95% de la banda Green.	63
Figura 38. Valores promedio e intervalos de confianza al 95% de la banda Red ...	64
Figura 39. Valores promedio e intervalo de confianza al 95% de la banda Nir	65
Figura 40. Cantidad de luz emitida en cada longitud de onda según el tipo de iluminación.....	66

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Figura 41. Promedio de la Resistencia a la compresion de los cilindros de concreto para cada muestra.	67
Figura 42.Reflectancia Vs Resistencia del concreto del día 1 al 28. Banda Green.	68
Figura 43.Reflectancia Vs Resistencia del concreto del día 1 al 28. Banda Red...	69
Figura 44.Firma espectral del concreto y otros materiales pétreos.....	70

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

RESUMEN

Con el fin de explorar alternativas para el control de la calidad del concreto estructural, se desarrolla este trabajo de grado orientado a examinar la relación entre la resistencia del concreto y su correspondiente nivel de reflectancia espectral.

Para esto se analiza, bajo un ambiente controlado, el comportamiento de 15 muestras de concreto diseñadas con una resistencia a la compresión de 21 MPa buscando explorar la relación entre su reflectancia espectral y resistencia; esta última, depende de las propiedades físicas y mecánicas del material. La reflectancia, se interpreta utilizando imágenes espectrales adquiridas con una cámara Tetracam Lite equipada con un sensor de 3,2 megapíxeles optimizado para la captura de longitudes de onda de luz visible superiores a 520 nm y longitudes de onda cercanas al infrarrojo de hasta 920 nm.

Primero, se identifican las variables que afectan el diseño de la mezcla, encontrando que el curado y la relación agua-cemento generan una variabilidad de aproximadamente 40% en la resistencia del concreto. Segundo, se planifican y diseñan los dispositivos de preservación de las muestras buscando mantener el experimento bajo un ambiente controlado regulando la cantidad de luz, humedad y polvo para impedir una variabilidad significativa en la toma de datos. Tercero, se recolecta la información de las muestras mediante un registro fotográfico para su posterior procesamiento y construcción de la firma espectral. Finalmente, se extraen los valores de reflectancia para examinar si existe una relación de estos con resistencia del concreto durante el proceso de fraguado.

Lo anterior, se hace cumpliendo los estándares de la norma NTC 673 para verificar la resistencia a la compresión simple que poseen las muestras cilíndricas de concreto. Los resultados indican que la variabilidad de los valores espectrales disminuye después del día 15 cuando el concreto ha ganado la mayor parte de su resistencia. Además, indican que existe una relación entre la ganancia de resistencia del concreto y la variabilidad de los valores de reflectancia obtenidos.

Palabras clave: métodos no destructivos, reflectancia, resistencia, concreto, respuesta espectral.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ABSTRACT

In order to explore alternatives for quality control of structural concrete, this project was elaborated evaluating the relationship between the strength of concrete and its corresponding level of spectral reflectance.

For that, behaviour of 15 samples of concrete designed with a strength of 21MPa were analyzed, in order to explore the relationship between their spectral reflectance and strength; the last one depends on the physical and mechanical properties of the material. The reflectance was tested using spectral images acquired with a Tetracam Lite camera equipped with a 3.2 megapixels sensor optimized for the capture of light wavelengths greater than 520 nm and near-infrared wavelengths of up to 920 nm.

First, the variables that affected the mixture desing were identified, finding that curing and water-cement ratio have a variability of approximately of 40% on the concrete strength. Second, preservation devices of the samples were planned and designed with the purpose of keeping the experiment under a controlled environment preventing the influence of external agents, like amount of light, humidity and dust on final results. Third, data information of the samples was collected by photographic record with a multispectral camera for the later processing and construction of the spectral signature. Finally, in order to examine the existence of a relationship between the concrete resistance and reflectance values on the setting period; values of reflectance were collected.

All of this was done following standards specified in the NTC 673 norm to verify simple compression resistance of cylindrical concrete samples. Results indicated that variability of spectral values decreases after the 15th day when concrete has gained most of its strength. Furthermore, they also point that there is a connection among the resistance gain of concrete and the variability of reflectance values obtained.

Keywords: non-destructive methods, reflectance, resistance, concrete, spectral response.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo pretende mostrar el impacto de la implementación de métodos de ensayo no destructivos en la caracterización de la resistencia del concreto, lo que significaría un avance en los procesos de aseguramiento de calidad en la industria de la construcción.

El análisis de imágenes espectrales se propuso como una alternativa viable de seguimiento al desempeño o inspección de estructuras de concreto, en complemento a los ensayos destructivos que se usan para tal fin en la actualidad; esta técnica podría representar un avance en los métodos de control actuales dado que permitiría determinar la distribución de propiedades altamente relevantes en el diagnóstico de calidad del concreto, como lo es la resistencia a la compresión in-situ, sin necesidad de afectar la composición de la estructura.

Primero y como base fundamental, se estableció una metodología que apuntó al cumplimiento del objetivo general que corresponde a la determinación de una relación entre la respuesta espectral de muestras de concreto y su resistencia, estableciendo las actividades a realizar, que son: el diseño de las muestras de concreto, los dispositivos para su preservación, la recolección de información de la resistencia mediante registro fotográfico, posterior procesamiento y construcción de la firma espectral, la elaboración de cilindros de concreto para la determinación de su resistencia y su posterior prueba, todo esto dispuesto en el documento en tres grandes partes: marco metodológico, metodología y desarrollo del proyecto.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

1. PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según CAMACOL, durante el 2014 la construcción de edificaciones en Colombia demandó inversiones cercanas a 28,5 billones de pesos en productos para la industria equivalentes al 16% del PIB nacional, siendo el concreto reforzado uno de los productos de mayor demanda (El Tiempo, 2016).

Dicho consumo se justifica en el amplio uso del concreto en la construcción de edificios, fundaciones, carreteras, muros de contención, puentes y muchas otras aplicaciones. Este material es altamente utilizado debido a su resistencia a la compresión, por lo que es necesario planear controles básicos de calidad de esta propiedad del concreto para asegurar que los requerimientos estructurales se cumplan. Este parámetro es comúnmente determinado por pruebas de compresión en probetas cilíndricas, siendo un procedimiento relativamente fácil de realizar en términos de muestreo (Shaban, 2013); sin embargo, el control de calidad mediante pruebas destructivas puede no ser representativo por diferencias en curado, vibrado, temperatura durante el fraguado, segregación, exudación, muestreo, compactación manual, humedad de curado, tapas planas, asentamiento y velocidad aplicación de la carga durante el ensayo de resistencia a la compresión..

Además, el método tradicional no está destinado a determinar la resistencia in-situ del concreto, ya que las probetas miden la calidad de la mezcla en condiciones de plena compactación y curado ideal a los 28 días luego de su colocación en obra, donde además, se compacta y se cura en condiciones distintas, casi siempre menos favorables (Revuelta Crespo & Gutiérrez Jiménez año).

En cuanto a la producción del concreto, cementeras reconocidas reportan variaciones en el diseño de las mezclas debido a la temperatura, contaminación de agregados, inadecuado manejo de materias primas, exceso de agua en las mezclas y capacitación del personal encargado de la fabricación, principalmente, lo que señala la variabilidad que puede tener el resultado de una mezcla de concreto (Ortiz Cangrejo, 2015).

Los aspectos mencionados anteriormente podrían derivar en falencias en la etapa constructiva de una edificación que pueden llevar a su colapso. Estas situaciones se han presentado a lo largo de los años, como es el caso de la edificación Zumrut en Turquía. En este edificio de 9 pisos de altura colapsó causando 92 muertes. Entre las causas del colapso se encontraron la mala calidad del concreto, una diferencia entre las cargas reales y las de diseño, además de espesores menores a los admisibles y sobrecarga del suelo (Universidad De los Andes, 2014).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

El caso anterior y las fallas de otros proyectos ponen de manifiesto la importancia de contar con métodos ágiles para monitorear la calidad del concreto, puesto que pueden presentarse variaciones en el diseño de la mezcla debido a problemas de calidad, tanto en los materiales como en la manipulación e instrumentación necesaria para su elaboración, como se indicó anteriormente.

Se identifica la necesidad de introducir mejoras en el control de obra mediante métodos de ensayo poco estudiados y relativamente nuevos, como se sustenta en el estudio publicado por Arita et al en 2001 . Esta investigación se enfocó en la evaluación de la degradación del concreto en estructuras artificiales como túneles, puentes y edificios a través de medidas en la superficie del concreto. Estas técnicas pueden ser una alternativa viable para estimar de manera rápida y confiable propiedades fundamentales para establecer la calidad del concreto, brindando la posibilidad de detectar problemas constructivos en los elementos estructurales a tiempo y tomar así las medidas de corrección adecuadas, con lo que se mejoraría, entre otras cosas, el monitoreo, tiempo de ejecución y salud estructural de cualquier obra.

La inspección del concreto mediante pruebas no destructivas se ha aplicado desde la mitad del siglo XX, con resultados diversos debido en gran parte a que, a diferencia de otros materiales homogéneos como el acero, el concreto es de composición y método de construcción altamente variable. Por ejemplo, los métodos con pulsos ultrasónicos tienen problemas de interferencia con las barras de acero de refuerzo ocasionando incertidumbre en la toma de datos. No obstante, cabe destacar que ha habido progreso en el desarrollo de estos métodos y los mismos han sido estandarizados por organizaciones como la ASTM, la CSA, la ISO y el BSI, haciendo viable el uso de estos (Malhotra & Carino, 2004).

Una de las alternativas no destructivas para determinar las propiedades del concreto es el método de análisis multiespectral, el cual consiste en caracterizar un material por medio de una firma espectral obtenida a partir del procesamiento de imágenes, determinando los valores de intensidad de energía reflejada (reflectancia) en las longitudes de onda del espectro electromagnético de la luz en las que el sensor capte radiación (Alava Ingenieros, 2011).

El método de análisis multiespectral permite derivar las propiedades físicas y químicas de diferentes materiales en un nivel detallado, lo que podría facilitar el análisis de la distribución de resistencia en un elemento de concreto. La resistencia, como señala Revuelta Crespo & Gutiérrez Jiménez (2008) puede variar a lo largo y ancho de un elemento de concreto, como una columna, debido a factores como el vibrado durante la colocación del concreto.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Considerando lo anterior, en este proyecto se exploró el uso de imágenes multispectrales para la caracterización del concreto. Para ello se utilizó una cámara multispectral Tetracam Lite, con la que se analizó una muestra de concreto de 21 MPa.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo General

Determinar si existe una relación entre la respuesta espectral de muestras de concreto y su resistencia analizando una mezcla de concreto.

1.2.2 Objetivos Específicos

Establecer las condiciones para la elaboración y preservación de las muestras de concreto.

Elaborar muestras de concreto y dispositivos para su preservación.

Construir la firma espectral a partir de los datos recolectados de las muestras en el laboratorio.

Validar la firma a partir de su comparación con las resistencias adquiridas de las muestras.

1.3 MARCO DE REFERENCIA

1.3.1 Antecedentes

Para el siguiente trabajo de grado se analizaron como antecedentes:

- Un artículo de Corea sobre el análisis de las características de la reflectancia del concreto de Lee (2012). Un estudio realizado en Tokio sobre la evaluación de la degradación del hormigón mediante teledetección hiperspectral de Arita, et al. (2001).
- Un artículo de Israel sobre la espectroscopia de reflectancia como herramienta para determinar la calidad del hormigón in situ de Brook & Ben-Dor (2011).
- Un estudio de India sobre el análisis y la clasificación de estructuras de concreto mediante procesamiento de imágenes de Rashmi, et al. (2013).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Un artículo de Florida sobre la determinación de las propiedades del concreto mediante el uso de la tecnología de imágenes hiperespectrales de Shaban (2013).

Al revisar los postulados enunciados en el artículo de Lee (2012), se encontró, de manera clara, oportuna y confiable, los fundamentos de análisis en el campo de las características de la reflectancia del concreto, las aplicaciones en estructuras pequeñas y medianas; así mismo la perspectiva de uso en cuanto a bases de datos que puedan recopilarse con el fin de estimar comportamientos estructurales a largo plazo a través de patrones definidos, teniendo en cuenta las condiciones de diferentes tipos de mezclas de concreto. Es un artículo que muestra los resultados de la extracción de las características de la reflectancia espectral de especímenes in situ, de concretos elaborados con diferentes proporciones de agua/cemento para diferentes edades de curado mediante un espectrómetro y una cámara hiperespectral VNIR. El trabajo le permitió al autor establecer una correlación superior al 95% en la medida de resistencia para especímenes con características similares.

Arita, et al. (2001) aportan en su estudio una investigación sobre un método de teledetección hiperespectral enfocado en la evaluación de la degradación del concreto en estructuras artificiales como túneles, puentes y edificios, a través de medidas en la superficie del concreto. El contenido de este estudio permite definir un punto de partida sobre las ventajas de la implementación de un método de ensayo no destructivo, entendiendo que mediante su uso es posible establecer parámetros físicos, químicos o biológicos, sin necesidad de tocar el objeto. Los autores concluyen que existe una correlación del 81% entre las firmas espectrales en longitudes de onda específicas, de acuerdo con las características intrínsecas de las superficies de concreto analizadas.

Otro antecedente útil para el desarrollo de este trabajo de grado fue el artículo de Brook & Ben-dor (2011). Este artículo ofrece un enfoque diferente en cuanto al método de caracterización de la composición del hormigón. Los autores establecen que, a menudo la estructura interna de los especímenes de laboratorio y piezas de pruebas evaluadas bajo métodos destructivos muestran diferencias respecto al hormigón de ensayo, por lo que se hace necesario incluir métodos de análisis de estructuras casi en tiempo real y con amplia cobertura.

El método de ensayo no destructivo implementado para evaluar corresponde a la reflectancia espectroscópica a través de una región espectral de infrarrojo cercano y corto visible en un rango de (400 a 2500 nm) y se constituye como un antecedente primordial en la ejecución del presente trabajo, debido a que deja asentado mediante resultados precisos el potencial y la eficacia de esta técnica, demostrando por medio de un método experimental (que combinó variaciones tanto de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

componentes de la mezcla como de tiempos de curado, envejecimiento y post-curado en la matriz), que la medición espectral acoplada a herramientas propias de análisis proporciona información significativa y precisa sobre el estado del concreto. Se concluye que esta herramienta es una aplicación innovadora en el campo de la ingeniería civil apta para mayor profundidad en investigación y posteriores implementaciones.

El artículo de Mane et al (2013) es un referente en el tema de análisis y procesamiento de imágenes. En su artículo, los autores explican de manera detallada las herramientas necesarias para mejorar la resolución de imágenes, reconstruir escenas tridimensionales y reconocer patrones para el control de estructuras de concreto. Los autores consideran los métodos de ensayo no destructivos como una técnica cualitativa que permite reducir el tiempo y el costo de detección de posibles fallas en una estructura. Afirman que es un método efectivo no solo en post-construcción, sino también en etapas constructivas para evaluar las principales características de la estructura.

Finalmente, es importante resaltar la propuesta establecida por Shaban (2013) en su estudio sobre la determinación de las propiedades del concreto mediante el uso de la tecnología de imágenes hiperespectrales. El autor presenta los elementos fundamentales de la tecnología hiperespectral y discute la posibilidad de aplicar sensores de imágenes hiperespectrales para determinar características in situ del concreto, explicando dicho método como una tecnología relativamente nueva que es utilizada por investigadores en aplicaciones que abarcan la identificación de minerales, la clasificación y exploración de la corteza terrestre, y el monitoreo principalmente. Establece que la única condición para aplicar el método es que el material objeto de análisis tenga un espectro reconocible.

La importancia de estos antecedentes en el desarrollo del presente trabajo está ligada al potencial de las técnicas de análisis espectral de imágenes en la determinación de propiedades del concreto. En los trabajos revisados se estableció que esta técnica puede ser utilizada para predecir propiedades de manera detallada. Las mediciones hiperespectrales son cada vez más importantes en la caracterización del hormigón en grandes superficies, proporcionando información precisa rápidamente en comparación con los muestreos de campo y ensayos experimentales posteriores en condiciones de laboratorio.

1.3.2 Conceptos

Banda espectral: Una banda es la región del espectro electromagnético en el cual las longitudes de onda adyacentes se comportan de forma similar o son generadas por mecanismos similares (Rodríguez & Arredondo, 2005).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Longitud de onda: La longitud de onda λ se define como la distancia que recorre una onda electromagnética en un tiempo igual a un período (Palma, 2011).

Radiación electromagnética: Es una forma de transmisión de la energía por medio de ondas electromagnéticas (Rodríguez & Arredondo, 2005).

Espectro electromagnético: El espectro electromagnético es todo el rango de la radiación electromagnética que se extiende en frecuencias de onda larga (1021 Hz) hasta onda corta (105 Hz). El espectro electromagnético se divide principalmente en 5 tipos de radiación, como se muestra en la figura 1, estas son: ondas de radio, luz (ultravioleta, visible e infrarrojo), radiación de calor, rayos X y rayos gamma. La luz visible es la que podemos observar que se extiende entre los 70 nm hasta los 400 nm (Shaban, 2013). A continuación, se presenta una imagen del espectro electromagnético.

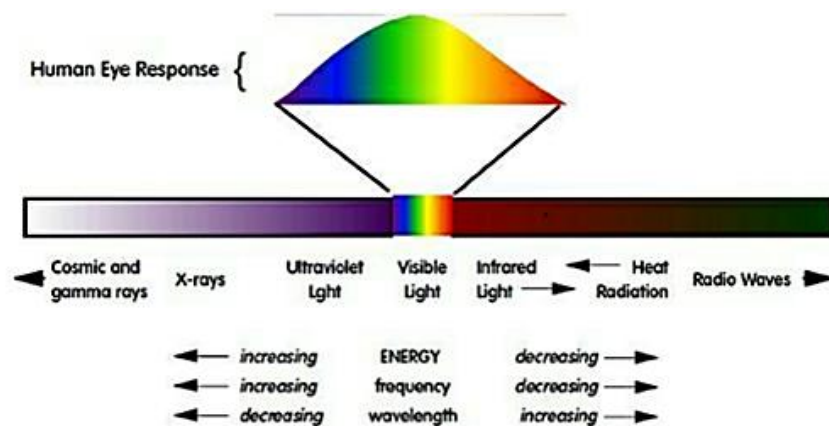


Figura 1. Espectro Electromagnético.

Fuente: (Shaban, 2013)

Firma espectral: Cuando la radiación electromagnética golpea a un objeto, la longitud de onda es reflejada, absorbida o transmitida a través del objeto, como lo ilustra la figura 2. La cantidad de energía reflejada, absorbida y transmitida depende de las propiedades físicas y composición química del objeto y de la longitud de onda de la radiación incidente. Para cualquier material la cantidad de radiación electromagnética que es reflejada, absorbida y transmitida varía con la longitud de onda de la radiación. Si el porcentaje de radiación reflejada (reflectancia) o emitida (emitancia) de un material es graficado contra el intervalo de longitudes de onda, el resultado es una curva que se conoce como firma espectral (Shaban, 2013).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

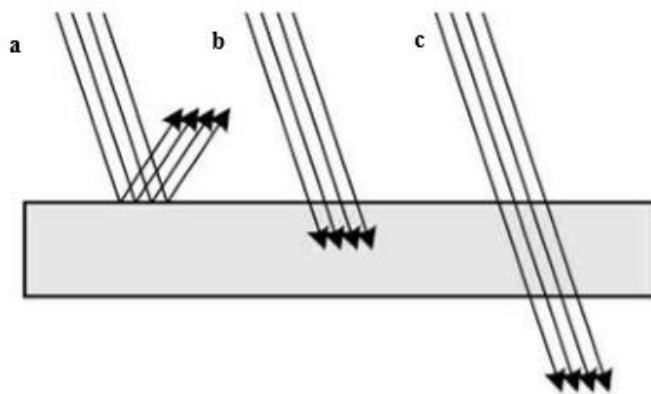


Figura 2 a. Reflexión b. Absorción c. Transmisión

Fuente: (Shaban, 2013)

Imagen espectral: Alava Ingenieros (2011) definen a una imagen espectral como aquella que captura datos de superficies dentro de rangos de longitud de onda específicos a través del espectro electromagnético.

Resistencia a la comprensión del concreto: El concreto es una mezcla que está compuesta por material cementante, agregado fino (arena), grueso (grava) y agua, la cual se endurece después de cierto tiempo formando una piedra artificial. Este tiempo es conformado por dos fases que se conocen como fraguado y curado. El fraguado inicia cuando el material cementante entra en contacto con el agua iniciando una reacción exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla que normalmente ocurre entre dos y cuatro horas después del inicio de la reacción (Villegas Negrete, 2012).

El proceso de curado es necesario para obtener un concreto con las especificaciones de resistencia esperadas. Éste busca que se mantengan durante un tiempo las condiciones de humedad y temperatura adecuadas hasta que se desarrolle la resistencia deseada. En resumen, el fraguado es el endurecimiento inicial donde el concreto puede ser vibrado sin que cambie su estructura interna, mientras que el curado es el proceso que asegura que el concreto desarrolle la resistencia esperada asegurando las condiciones de humedad y temperatura (Villegas Negrette, 2012).

Entre las propiedades mecánicas del concreto se destaca la resistencia a la comprensión ($f'c$), que se define como la capacidad de soportar una carga por unidad de área y se expresa en unidades de esfuerzo. La forma como se determina el esfuerzo último de comprensión es a partir de un ensayo de comprensión simple que

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

se encuentra reglamentado por la ASTM C 39 y la NTC 673 (Villegas Negrete, 2012).

1.3.3 Métodos de ensayo

Los métodos de ensayo para la verificación de propiedades fundamentales del concreto son importantes en tanto que se identifican como una medida base de cumplimiento con los requerimientos especificados previamente en el proyecto; sin embargo, es necesario conocer las limitaciones y las propiedades evaluadas con cada método de control, con el fin de optimizar recursos de tiempo y dinero (Badilla, 2014).

De acuerdo con los requerimientos del proyecto, se consideró la clasificación de métodos de ensayos (destructivos y no destructivos).

Métodos de control destructivos

De acuerdo con lo propuesto por Malhotra & Carino (2004), se entiende como método de control destructivo aquel método que requiere generar daños o roturas a la pieza sometida al ensayo, con el fin de determinar el comportamiento del material frente a requerimientos de tipo físico tales como resistencia, desgaste, dureza, esfuerzos de tracción y compresión principalmente.

Ensayo de rotura o compresión simple: El uso generalizado del ensayo de compresión a rotura de probetas se debe, en gran parte, a su sencillez. Se considera como un método adecuado para determinar la calidad del hormigón. Sin embargo, según Badilla (2014) este tipo de ensayo presenta varios inconvenientes entre los que cabe mencionar:

- La obtención de los resultados tarda aproximadamente un mes después del encofrado.
- La dispersión de los datos es relativamente alta.
- Es un ensayo que no permite la reutilización de las probetas.
- La muestra de las probetas puede no ser representativa de la mezcla de la estructura debido a las diferentes condiciones de puesta en obra (vibrado y curado).

En la siguiente figura se presenta el ensayo a compresión simple.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Figura 3 Ensayo de rotura o compresión simple

Fuente: (Instron, 2013)

Extracción de núcleos: El ensayo de extracción de núcleos es considerado por Céspedes García (2003) como el más concluyente para determinar la resistencia a compresión de un concreto. Esta prueba consiste en una broca cilíndrica hueca en cuyo extremo van incrustados cristales de diamante, los cuales, por abrasión, desgastan el material circundante. La siguiente figura muestra el montaje de este ensayo.



Figura 4 Ensayo de extracción de núcleos

Fuente: (Penaloza, 2014)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

No obstante, existe una serie de factores que puede influir sobre la determinación de la resistencia del concreto mediante este ensayo, tales como el diámetro del núcleo y la relación longitud/diámetro. Además de someter al concreto a un esfuerzo de corte para el cual no está diseñado

En Colombia el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) propone una tabla con factores de corrección de la resistencia para distintas relaciones Longitud/Diámetro.

Tabla 1 Factor de corrección de resistencia de acuerdo con la relación L/D.

Fuente: Instituto Nacional de Vías (2012).

Relación L/D	Factor de corrección de resistencia
1,75	0,98
1,50	0,96
1,25	0,93
1,00	0,87

Prueba de resistencia a la penetración: la prueba de resistencia a la penetración calcula la resistencia del concreto a partir de la profundidad de la penetración de una varilla metálica impulsada por una carga estipulada de pólvora. (Céspedes García , 2003). A continuación, se ve el equipo usado para este ensayo.



Figura 5. Penetrómetro digital

Fuente: (Zhejiang Tugong, 2003)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Para condiciones estándar de prueba su principio de funcionamiento se basa en que la penetración es inversamente proporcional a la resistencia a la compresión del concreto, pero la relación depende de la dureza del agregado.

En cuanto al desarrollo de este ensayo, las sondas se introducen en grupos de tres cercanos entre sí, y se emplea la penetración promedio para calcular la resistencia.

Prueba de la extracción o Pull – Out: El ensayo destructivo de extracción es una prueba que mide, mediante un ariete de tensión, la fuerza requerida para desprender una varilla de acero con un extremo de mayor sección transversal previamente empotrada, generalmente de 25 mm de diámetro (Céspedes García , 2003).



Figura 6. Prueba de la extracción o Pull – Out

Fuente: (NEODEX-Concrete Non Destructive Testing, 2017)

Para el desarrollo de este ensayo se extrae un cono de concreto, cuya fuerza requerida está relacionada con la resistencia a la compresión del concreto original (Figura 6).

Métodos de control no destructivos

Según Badilla (2014), los métodos de ensayo no destructivos permiten evaluar las propiedades del material sin dañar la estructura y se constituyen como métodos recomendables en estructuras que por razón funcional deben presentar un nivel de acabado bueno.

La principal ventaja de los métodos de ensayo no destructivos es que no perjudican el rendimiento de la obra, en tanto que se suprimen costos suplementarios de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

tiempo y mano de obra generados por daños que pueden ser eventualmente causados y posteriormente reparados por otros métodos de control como los destructivos.

Entre los métodos de ensayo no destructivo destacan los siguiente:

Ensayo con esclerómetro: de acuerdo con lo postulado por Malhotra & Carino (2004), el ensayo con esclerómetro pretende proporcionar una estimación de la resistencia a la compresión del concreto basándose en la correlación entre dicha resistencia y su dureza superficial. En la siguiente figura se muestra el ensayo con esclerómetro.



Figura 7. Ensayos Esclerómetros

Fuente: (Comercial de Ingeniería DAGA, 2012)

Céspedes García (2003) establece, además, que las principales formas para determinar la dureza superficial son:

- Medición de la huella impresa por una bola (martillo Frank).
- Medición de la profundidad de la penetración de un clavo (sonda Windsor).

El principio activo en cada uno de los ensayos mencionados se basa en el impacto de la superficie del concreto con una determinada masa cargada de energía cinética con el fin de medir la magnitud de la fuerza, del rebote, o de la profundidad de penetración, según el ensayo, y de esta forma correlacionar el resultado con la resistencia del concreto.

La principal ventaja de este tipo de ensayos es que son rápidos, económicos y permiten estudiar la uniformidad superficial del concreto; aunque presentan limitaciones en la estimación de resistencia por factores tales como la rugosidad, la

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

forma de la superficie, las condiciones de humedad, el tamaño y el tipo de los agregados, principalmente (Céspedes García , 2003).

Prueba del martillo de rebote: la prueba del martillo de rebote está basada en el principio de correlación entre el rebote de una masa elástica y la dureza de la superficie contra la que golpea la misma (Malhotra & Carino, 2004).

En esta prueba se impulsa una masa cargada de energía mediante un resorte hasta una posición determinada, presionando el émbolo contra la superficie del concreto que se quiere probar. Al liberarlo, la masa rebota del émbolo que aún está en contacto con el concreto y la distancia recorrida por la masa, expresada como porcentaje de la extensión inicial del resorte, es lo que se llama número de rebote (Malhotra & Carino, 2004). En la figura 8 se muestra el ensayo del martillo rebote.



Figura 8. Ensayo de martillo rebote

Fuente: (Patologías Construcción, 2013)

Teniendo en cuenta que el número de rebote depende de la energía almacenada en el resorte y del volumen de la masa, es posible afirmar que se constituye como una medida para determinar relaciones empíricas entre la dureza y la resistencia del concreto solo para concretos similares curados de cierta forma (Malhotra & Carino, 2004).

Velocidad de pulsos ultrasónicos: El ensayo de velocidad de pulsos ultrasónicos, según lo prescrito en la ASTM C597-16 (2016), determina la velocidad de la propagación de un pulso de energía vibratoria a través de un elemento de concreto.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

El principio operacional de este ensayo se basa en el envío de una onda de corta duración hacia un transductor de recepción, haciéndolo vibrar en su frecuencia resonante, transfiriendo dichas vibraciones al concreto a través de un líquido viscoso como acoplador.

El pulso vibratorio emitido viaja a través del elemento y es detectado por un transductor de recepción posicionado en la superficie opuesta del concreto. Finalmente, al recibir el pulso, el temporizador electrónico se da vuelta y se visualiza el tiempo transcurrido del recorrido (Céspedes García , 2003). En la siguiente figura se muestra el montaje de este ensayo.

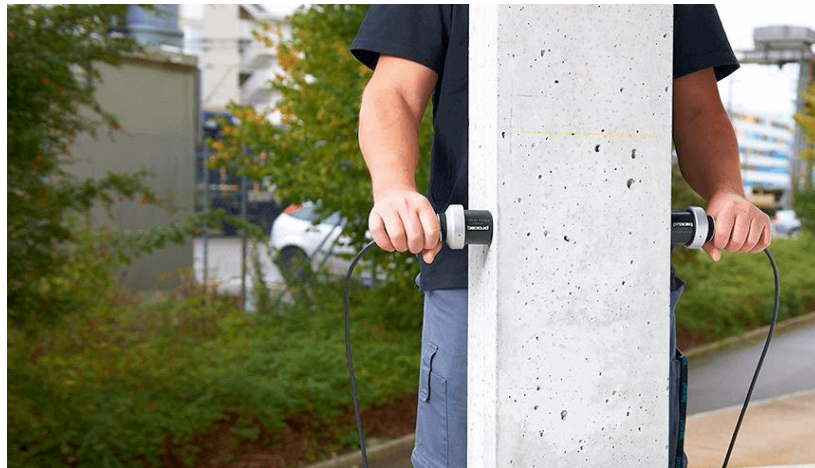


Figura 9. Ensayo de velocidad de pulsos ultrasónicos

Fuente: (Silva, 2017)

De acuerdo con lo establecido en la ASTM C597-16 (2016), este método es aplicable para:

- Evaluar la uniformidad y la calidad relativa del concreto.
- Indicar la presencia de huecos y grietas.
- Evaluar la eficacia de las reparaciones de grietas.
- Indicar cambios en las propiedades del hormigón.
- Estimar la gravedad del deterioro en el levantamiento de estructuras.
- Monitorear cambios en las condiciones de las estructuras a lo largo del tiempo.

Cilindros de hormigón moldeados in situ: Este ensayo es un método de prueba estándar para determinar la resistencia a la compresión del concreto mediante la

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

obtención de especímenes cilíndricos de losas recientemente vaciadas, por lo que no se necesita perforar para obtener muestras (Céspedes García , 2003)

Este método se describe en la ASTM C873 / C873M-15 (2015) y establece como se determina la resistencia a compresión de los especímenes cilíndricos de hormigón que han sido moldeados en el lugar utilizando moldes especiales adheridos al encofrado. Su uso se limita a losas donde la profundidad del concreto es de 125 a 300 mm. El objetivo de esta técnica es obtener una muestra de prueba perteneciente a la misma historia termal que el concreto en la estructura, quitando el molde de la losa y eliminándolo del cilindro de concreto, para finalmente probar el cilindro a compresión. A continuación, se observa una imagen de este método.



Figura 10. Cilindros de hormigón moldeados en el lugar

Fuente: (NRMCA, 2018)

La resistencia de los cilindros vaciados puede utilizarse en aplicaciones como:

- La estimación de la capacidad de carga de las losas.
- La determinación del tiempo de remoción de la formaleta.
- La determinación de la eficacia del curado y protección del concreto.

Sin embargo, este método presenta desventajas en cuanto a la inexistencia de una relación única entre la fuerza de los cilindros colados en el lugar y los núcleos de la misma edad, debido a diferencias de condición de humedad, grado de consolidación, tamaño de la muestra y relación longitud-diámetro, principalmente

1.4 MARCO METODOLÓGICO

1.4.1 Variables que influyen en la resistencia a la compresión del concreto







La variabilidad de la resistencia a la compresión del concreto puede darse desde la elaboración de la mezcla hasta el momento de fallar los cilindros. Como se muestra

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

en las tablas 2, 3 y 4, estos errores se pueden dar en cuatro 4 grandes etapas. En cada una hay procesos y causas básicas que afectan a la resistencia del concreto.

Tabla 2. Causas en variabilidad del concreto (Materiales).

Fuente: (Orozco, 2015)

ÍTEM	CAUSA BÁSICA	CAUSA DE VARIACIÓN	POSIBILIDAD DE OCURRENCIA	EFECTO DE LA RESISTENCIA
MATERIALES				
1	 Cemento	Tipo y composición	Con diferentes marcas	Considerable variación
2		Control en la fabricación	Una sola marca	Puede ser considerable
3		Edad y condición	Siempre es posible	Considerable variación
4	 Agua	Presencia de sales	Poco frecuente	Generalmente pequeño
5		Relación agua - cemento	Depende del control	Gran efecto
6	 Agregado fino	Reactividad química	Comúnmente no ocurre	Puede ser considerable
7		Partículas variables	Poco frecuente	No generalizado
8		Propiedades no uniformes	Poco frecuente	No generalizado
9		Limpieza	Siempre es posible	Puede ser considerable
10		Forma de las partículas	Triturado y natural	No dentro de un mismo tipo
11	Gradación	Siempre se presenta	A través de la manejabilidad	
12	 Agregado grueso	Reactividad química	Poco común	No apreciable
13		Partículas variables	Depende de la fuente	Generalmente pequeño
14		Propiedades no uniformes	Con material poroso	No generalizado
15		Limpieza	Siempre es posible	Puede ser considerable
16		Forma de las partículas	Triturado y natural	Puede ser considerable
17		Gradación	Siempre se presenta	A través de la manejabilidad
18		Tamaño máximo	Con diferentes mezclas	A través de la manejabilidad
19	 Temperatura	Cemento	Cemento caliente	No apreciable
20		Agua	Climas extremos	No generalizado
21		Agregados	Climas extremos	No generalizado
22	 Mezcla	Cambios en pasta - agregados	Variaciones deliberadas	A través de la manejabilidad

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 3. Causas en variabilidad del concreto (Dosificación y Mezclado)







Fuente: (Orozco, 2015)

ÍTEM	CAUSA BÁSICA	CAUSA DE VARIACIÓN	POSIBILIDAD DE OCURRENCIA	EFFECTO DE LA RESISTENCIA	
DOSIFICACIÓN					
23		Cemento	Error en el pesaje	Infrecuente	No se puede considerar
24			Medida por volumen	No en planta central	Errores +/- 20%
25		Agua	Adicionada directamente	Cuando es a crterio	No es medible
26			Contenido de arena	Muy común	Considerable
27			Arena abultada	No es planta central	Puede ser considerable
28			Con agregado grueso	Por periodos	Puede ser considerable
29		Agregado fino	Cambios, abultamiento	No en planta central	Errores +/- 20%
30		Agregado grueso	Cambios, operación	Con control llimitado	Generalmente pequeño
MEZCLADO					
31			Orden de cargue	Depende del operador	Generalmente no importante
32			Primera mezcla	Sólo ocasionalmente	Puede ser considerable
33			Mezclar rápido	Con diferentes plantas	No generalizado
34			Sobrecargado	Infrecuente	No generalizado
35			Tiempo de mezclado	Frecuente	Variación puede exceder el 30%

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 4. Causas en variabilidad del concreto (Ensayo)

Fuente: (Orozco, 2015)

ÍTEM	CAUSA BÁSICA	CAUSA DE VARIACIÓN	POSIBILIDAD DE OCURRENCIA	EFECTO DE LA RESISTENCIA
ENSAYO				
36	 Manejo y muestreo de los especímenes	Segregación	Transporte y manejo	Planos de falla
37		Cambios en los componentes	Cuando hay retemplado	Imposible de estimar
38		Muestreo	Diferentes sitios	Puede ser apreciable
39		Exudación	Mezclas con poca agua	Generalmente pequeño
40		Compactación manual	Mezclas secas	Considerable, excede el 50%
41	 Compactación de los especímenes	Vibración	Sobrevibración	Segregación en los especímenes
42		Golpe	Manejo después del fraguado	Inducción de fisuras
43		Orientación de partículas	Planos de falla	Partículas planas - 40%
44		Tamizado húmedo	Concreto masivo	Aumenta con el tamizado
45	 Tamaño y forma de especímenes	Tamaño del espécimen	Moldes no normalizados	Decrece con el tamaño
46		Relación altura - diámetro	Moldes no normalizados	Decrece con el incremento de la relación
47		Forma	Cubo o cilindro	Menor en cubos
48		Moldes Irregulares	Moldes no normalizados	Carga no axial
49		Secado exterior	Primeras 24 horas	Pequeño
50	 Curado de los especímenes	Humedad de curado	No hay curado	Decrece considerablemente
51		Temperatura Inicial	Condiciones de congelamiento	Infrecuente
52		Temperatura	Curado en invierno	Variación considerable
53		Edad	Comparable a la misma edad	Incremento continuo
54		Contenido de humedad	Con especímenes secos	40% de diferencia
55		Tapas planas	Falla muy común	Concavidad 30%, Convexo 50%
56	 Refrentado de los especímenes	Material de refrentado	No apropiado	Puede ser apreciable
57		Ejes del espécimen	Problema técnico	Generalmente Pequeño
58		Cojinete de carga	Dependiente del laboratorio	Puede ser considerable
59	 Máquina de ensayo	Centramiento	Dependiente del laboratorio	Puede ser apreciable
60		Velocidad de carga	Dependiente del laboratorio	Generalmente pequeño

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En las tablas 2 y 3 se puede observar que la relación agua/cemento es la variable que más afecta en la etapa de dosificación, en tanto que la temperatura tiene un efecto significativo durante la etapa de curado. En la etapa de ensayo la preparación de las muestras afecta de manera significativa, generando una variabilidad de hasta 40%.

1.4.2 Técnica de inspección no destructiva usada en el desarrollo experimental

Imágenes multi e hiperespectrales

Para construir la firma espectral del concreto a partir del análisis de imágenes multi e hiperespectrales se debe comprender las diferencias entre una imagen multispectral y una hiperespectral.

Alava Ingenieros (2011) establecen como principal diferencia el número de bandas espectrales que las componen.

Las imágenes multispectrales están formadas por un rango de bandas que oscilan entre 3 y 20, no necesariamente consecutivas, que permiten un análisis posterior de la imagen mediante la obtención de valores de intensidad (reflectancia) en las longitudes de ondas discretas en las que el sistema capte radiación. Por otro lado, las imágenes hiperespectrales son capaces de entregar datos de alta resolución espacial y alta resolución radiométrica. Estas imágenes se componen de un número mayor de 200 bandas contiguas entre sí, con lo que es posible obtener el espectro continuo del objeto de análisis (Shaban, 2013). En la siguiente figura se observa la diferencia de una firma espectral construida con una cámara multi espectral y una cámara hiper espectral.

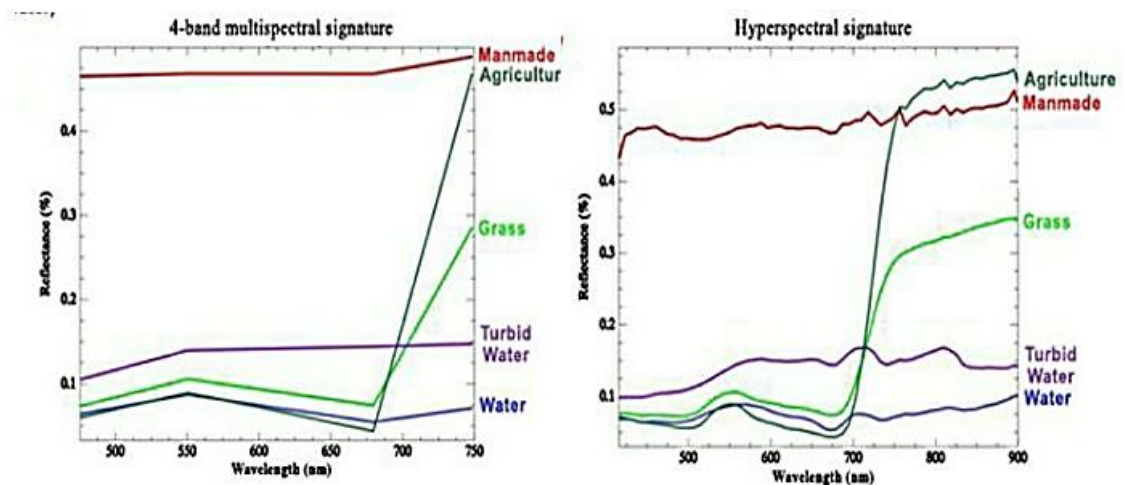


Figura 11. Imagen multispectral (izquierda). Imagen hiperespectral (derecha)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Fuente: (Shaban, 2013)

El modo en que se capturan las imágenes difiere enormemente. Mientras las cámaras multispectrales son de tipo *frame* y toman imágenes con 2 dimensiones espaciales (X, Y), los sistemas de imagen hiperespectral tipo *pushbroom* generan “imágenes” con 1 dimensión espacial y una dimensión espectral (X, Z).

En cuanto al uso de uno u otro tipo de imágenes, se puede decir que las imágenes hiperespectrales ofrecen mucha más información cuantitativa y se emplean como herramientas de diferenciación y clasificación espectral, mientras que las imágenes multispectrales contienen menos información, pero son muy útiles cuando se reconocen las longitudes de onda que diferencian uno u otro material.

Para determinar la firma espectral se usa una cámara espectral que registra la cantidad de energía emitida por el material con respecto a su longitud de onda, la cual se presenta a continuación.

1.4.3 Análisis de relación entre variables

La correlación es una técnica estadística usada para determinar la relación entre dos o más variables (Gustavo, 2002). El coeficiente de correlación es un valor cuantitativo que puede variar de -1 hasta 1. La correlación de proporcionalidad directa se da con valores mayores a 0, mientras que la correlación de proporcionalidad inversa se da con valores menores a 0; y cuando las variables no tienen relación es coeficiente de correlación es 0 (Gustavo, 2002).

El cálculo del coeficiente de correlación está dado por la siguiente expresión matemática:

$$r = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{N \sum X^2 - (\sum X)^2} * \sqrt{N \sum Y^2 - (\sum Y)^2}}$$

Donde:

r: Coeficiente de correlación

N: Numero de datos a analizar

X: Desviación estándar de la variable x

Y: Desviación estándar de la variable y

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Adicionalmente, existen muchas aplicaciones informáticas de análisis estadísticos como por ejemplo R, Statsgraphics y Excel, entre otros, que facilitan este análisis.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2. METODOLOGÍA

Con el fin de cumplir los objetivos que se plantearon en la sección 1, se llevó a cabo un procedimiento metodológico secuencial según cada objetivo específico.

2.1 ETAPA 1: DEFINICIÓN DE VARIABLES

2.1.1 Identificar las variables claves que afectan el diseño de mezcla

Como se mencionó anteriormente, las variables que más afectan a la resistencia del concreto en el proceso de dosificación es la relación agua/cemento, que pueden llegar a dar una variabilidad del 40% con la resistencia esperada. Por lo que en el momento de la elaboración de la mezcla se realizó la corrección por humedad de los materiales pétreos, la cual consistió en determinar la diferencia de pesos húmedos y secos de los agregados para luego disminuir esta proporción de la cantidad de agua de la mezcla.

2.1.2 Definir el tamaño de muestra de los especímenes sujetos a estudio

Para definir el tamaño de la muestra, se recurrió a la ayuda de los ingenieros expertos Jairo Alberto Gómez Lizarazo y Carlos Blandón Uribe, asesores del trabajo, quienes determinaron que con la elaboración de 15 plaquetas de ensayo de concreto de dimensiones 30 x 25 cm era suficiente, entendiendo que, con una técnica de re-muestreo se podría obtener el valor medio de la varianza de la mezcla para garantizar una confiabilidad del 95%. Con el fin de garantizar que el experimento sea representativo de una población, cada plaqueta se elaboró por separado utilizando el mismo diseño.

Para cada una de las plaquetas anteriormente mencionadas, se extrajeron 8 probetas cilíndricas para el ensayo la resistencia a la compresión de la mezcla. Este número de probetas de ensayo fue definido en conjunto con el profesor Carlos Blandón Uribe, teniendo en cuenta la capacidad de almacenamiento con la que contábamos y edades de curado del concreto en las que debíamos fallar (3 días, 7 días, 28 días). Con lo que se decidió fallar de a dos probetas de ensayo cilíndricas garantizando que no hubiera una variabilidad mayor al 10% entre los resultados, y en caso de que así fuera se debía fallar una tercera muestra y así sucesivamente para los otros días, en el caso de que llegase a sobrar una muestra la guardaríamos para ser fallada como testigo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.2 ETAPA 2: CONSTRUCCIÓN DE LA FIRMA ESPECTRAL.

2.2.1 Elementos conservación de muestras y control de condiciones

Con el fin de disminuir la variabilidad en la toma de datos se decidió controlar las condiciones que afectan a las muestras de concreto, como la cantidad de luz a la hora de obtener la reflectancia de la muestra, la distancia de la cámara a la muestra, la humedad de los especímenes y el polvo, por lo que pensamos llevar a cabo la construcción de una caja de MDF para la cámara y dispositivos de almacenamiento (cajas herméticas) para las plaquetas de concreto.

2.2.2 Registro fotográfico

Se realizó un registro fotográfico de las muestras de concreto definidas en la etapa anterior con una cámara multiespectral Tetracam Lite durante 28 días correspondientes al tiempo de fraguado del concreto, siempre bajo condiciones similares de luminosidad y temperatura. Las fotos se tomaron a una distancia de 30 cm de la muestra, con el fin de lograr el enfoque requerido por la cámara.

2.2.3 Procesamiento de la información espectral

Las imágenes espectrales se procesaron para obtener valores de reflectancia. Primero, se descargaron las imágenes y se separaron en las 3 bandas que componen las imágenes tomadas por la cámara Tetracam Lite (NIR, RED, GREEN) mediante el uso del software Pixelwrench 2 se realizó la conversión de formato, se guardó cada banda en una carpeta.

Debido a que los valores de cada pixel de las imágenes estaban almacenados en una escala de números digitales (ND), se usó el software ArcMap para realizar un modelo para transformar los ND en valores de reflectancia, obteniendo de esta forma una estimación sobre los valores de reflectancia para cada una de las plaquetas y para los diferentes días de curado.

El análisis estadístico de los valores obtenidos de cada imagen y para cada banda se realizó mediante el software R.

2.2.4 Construcción de la firma espectral

Una vez realizado el análisis estadístico se procedió a graficar la firma espectral para cada pixel de la imagen por medio de la función *persp3D* del software R.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.3 ETAPA 3: VALIDACIÓN DEL MÉTODO

2.3.1 Validación del método por medio de la comparación con la resistencia del concreto obtenida por ensayos tradicionales

Una vez se obtuvieron los resultados de la firma espectral y de la resistencia de los cilindros, se llevó a cabo un análisis estadístico para establecer la correlación entre la reflectancia y la resistencia a la compresión del concreto.

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 EXPERIMENTO PRELIMINAR

Se realizó un ensayo del experimento previo a este proyecto durante la participación de los autores en el semillero de investigación en estructuras y concreto del profesor Carlos Blandón.

Para este ensayo se prepararon 30 placas de concreto de 30 cm x 30 cm x 10 cm. 15 de las muestras de concreto se fabricaron con una relación agua-cemento de 0,5 y otras 15 con 0,55. Para cada mezcla se elaboraron 15 cilindros para medir la resistencia a la compresión del concreto.

Las probetas se ubicaron dentro y fuera del laboratorio de estructuras para simular diferentes condiciones de iluminación (figura 12).



Figura 12. Ubicación de muestras de concreto en el laboratorio de estructuras afuera (izquierda) adentro (derecha)

Fuente: Elaboración propia

Los ensayos de compresión se efectuaron a los 3, 7, 14, 21 y 28 días de curado. A los 14 y 21 días se ensayaron dos probetas, si se obtenían resultados que diferían

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

en más del 10% se ensayaba una tercera. A los 3, 7 y 28 días se ensayaron tres probetas. Este diseño experimental fue indicado por el profesor del semillero.

A continuación se presentan algunos de los ensayos a compresión simple realizados a los cilindros de muestra durante la etapa de curado.



Figura 13. Falla de cilindros de concreto.

Fuente: Elaboración propia

Se tomaron 3 fotos diarias de cada muestra durante 30 días. Las imágenes fueron procesadas utilizando el software ArcGIS y Excel. En primer lugar, se transformó el formato original de las imágenes *.RAW a *.TIFF para poder calcular los valores de reflectancia. Luego, se estimaron los valores promedio de cada muestra y cada día. El resultado se puede apreciar en las figuras 14, 15, 16 y 17, sobre las cuales el eje Y representa valores de reflectancia de 0 a 1, en tanto que el eje X los días transcurridos correspondientes al periodo de análisis.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

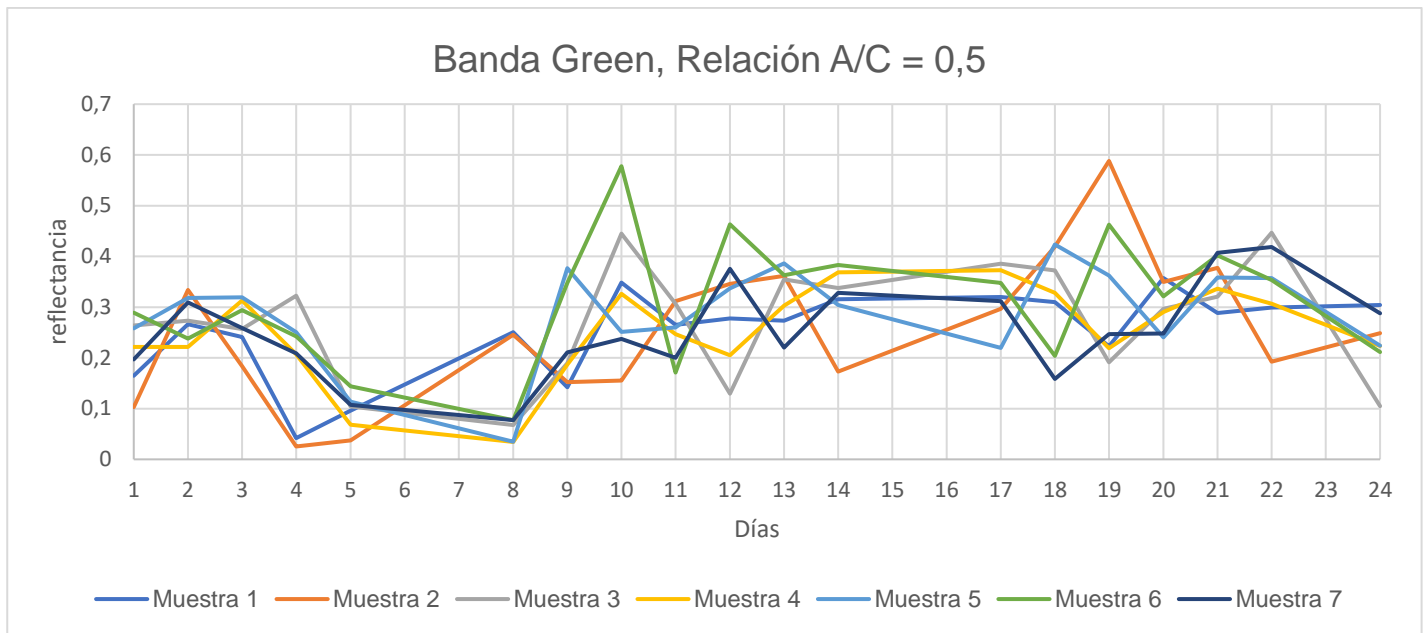


Figura 14. Banda Green, Relación A/C = 0,5

Fuente: Elaboración propia

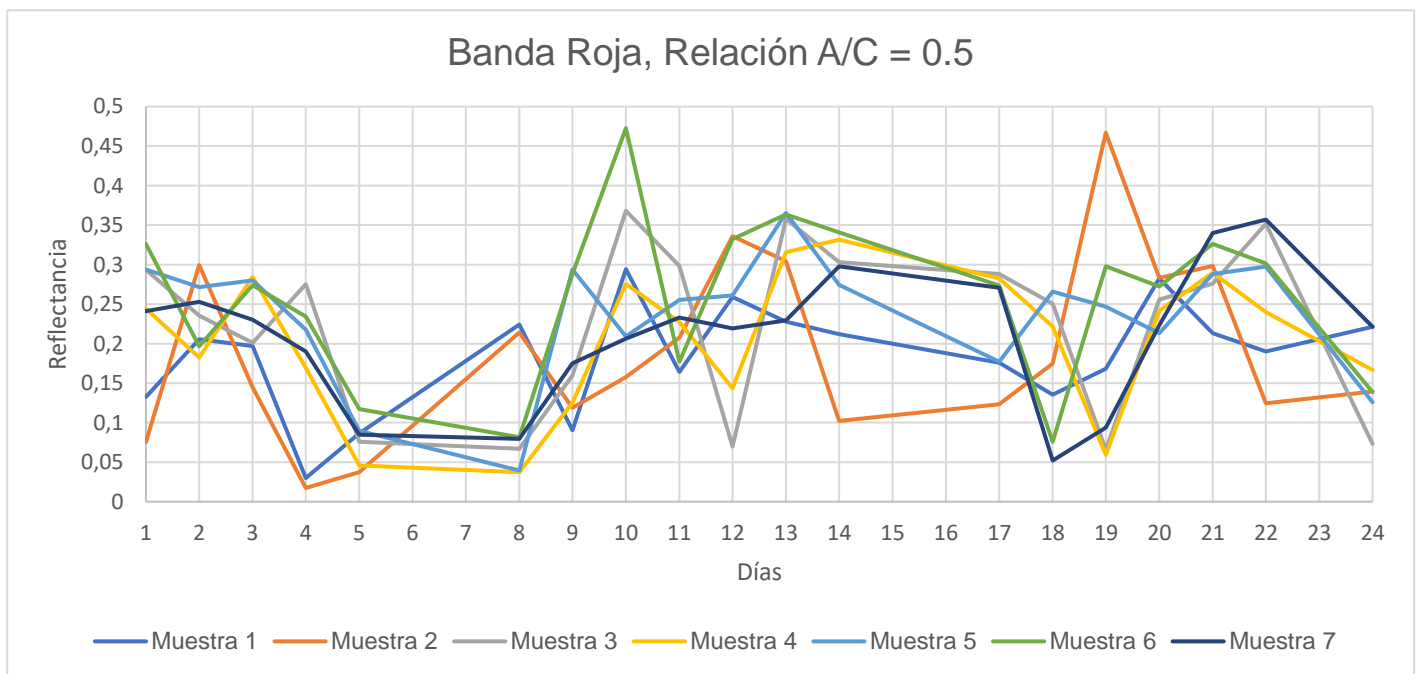


Figura 15. Banda Red, Relación A/C = 0,5

Fuente: Elaboración propia

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Banda Green, Relación A/C = 0,55

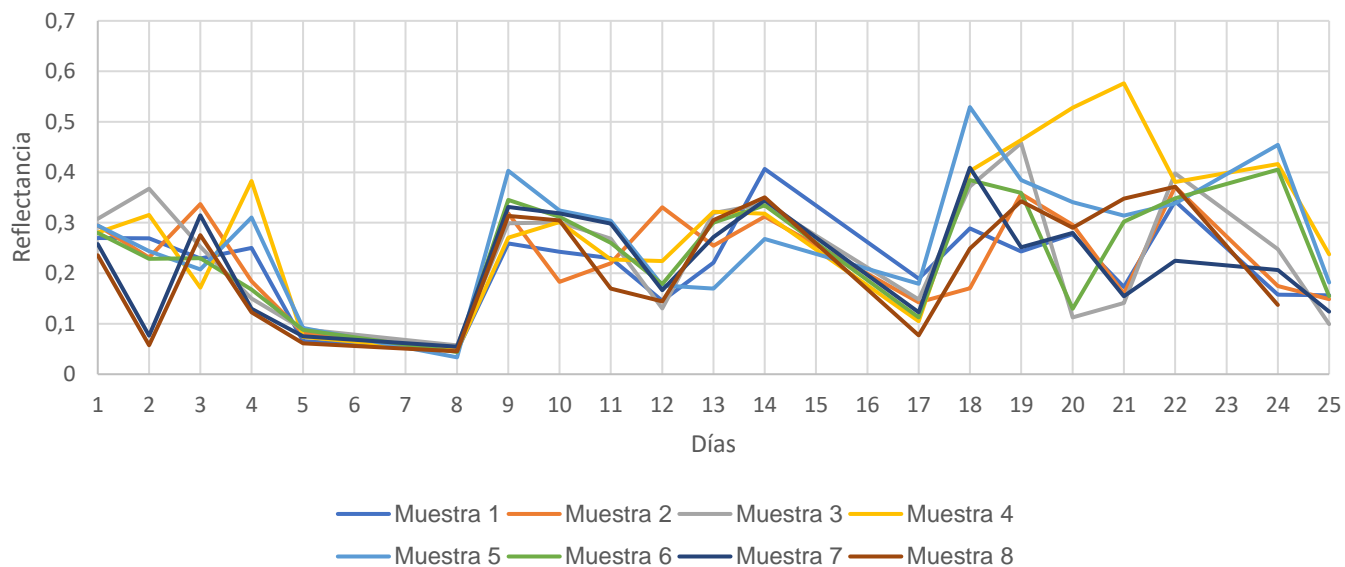


Figura 16. Banda Green, Relación A/C = 0,55

Fuente: Elaboración propia

Banda Roja, Relación A/C = 0.55

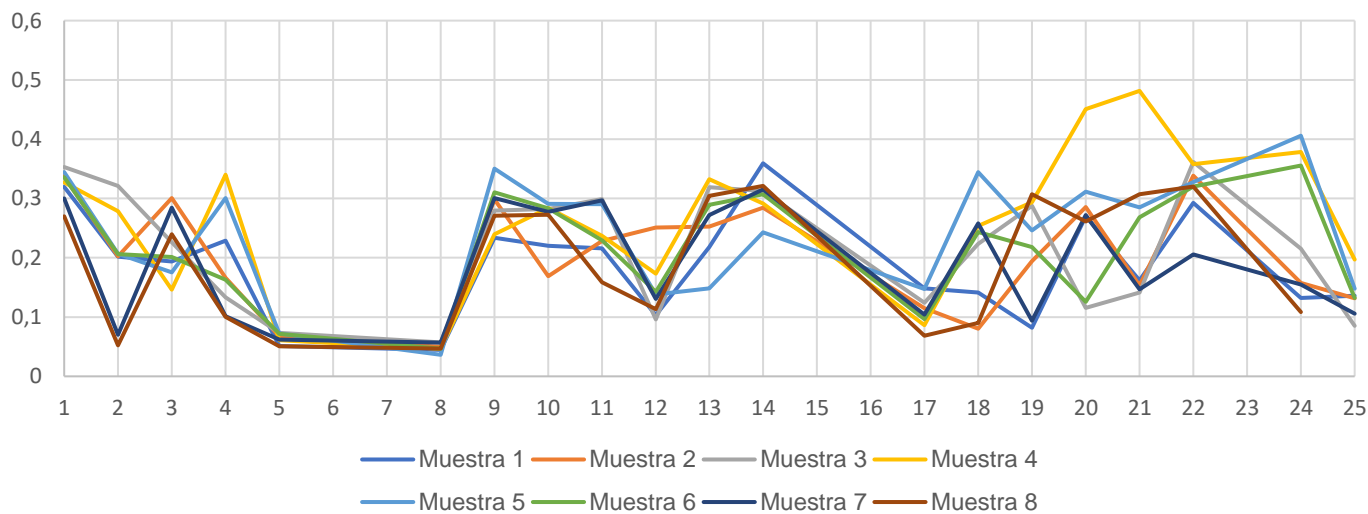


Figura 17. Banda Red, Relación A/C=0,55

Fuente: Elaboración propia

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En esta figura se muestran solo los resultados de 15 probetas que se ubicaban dentro del laboratorio, a causa de que las muestras que se encontraban afuera del laboratorio fueron trasladadas durante su remodelación por lo que se perdió el orden de los datos y fue imposible analizarlos.

En estas gráficas se puede observar una gran variación en los valores de reflectancia para las muestras de concreto. Luego de analizar los resultados con la ayuda de los profesores Carlos Blandón, Jairo Gómez y Engelberth Soto, se concluyó que esta variación obedeció a múltiples factores, entre ellos:

-La variación natural de la mezcla de concreto. Las plaquetas de concreto de 30 cm x 30 cm x 10 cm, no presentaron las mismas propiedades en su superficie, algunas se ubicaron con el lado de la formaleta hacia arriba y otras, al contrario, lo que produjo una rugosidad distinta.

-La variación en la relación agua-cemento, se pueden ver que en las gráficas de relación 0,5 tienen una desviación estándar promedio de 0,33 mientras que las gráficas de relación 0,55 tienen una desviación promedio de 0,21.

-La variación en las condiciones de iluminación. En la figura 16 se puede observar que algunas muestras de las que se encontraban adentro del laboratorio estaban más expuestas a luz solar que otras.

Estas variables no permitieron interpretar completamente los resultados, pues no fue claro cuál fue el factor que dominó la reflectancia. Sumado a esto, las probetas de concreto fueron afectadas por los trabajos de adecuación del laboratorio de estructuras, lo que produjo contaminación con polvo, además de que tuvieron que ser reubicadas para permitir dichos trabajos, lo que modificó las condiciones iniciales.

A pesar de que los resultados no fueron concluyentes, esta prueba piloto sirvió para mejorar el diseño del experimento, tomándose las siguientes decisiones:

1. Reducir a una sola mezcla de concreto para eliminar la variación del contenido agua-cemento.
2. Reducir el número de muestras de 30 a 15, dado que solo se tendría un diseño de mezcla.
3. Aumentar el número de réplicas de mezcla. En la prueba piloto se produjo la mezcla de concreto por duplicado, una por cada relación agua-cemento. Para el ensayo siguiente se fabricaría individualmente para cada probeta de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ensayo, de manera que se reprodujera la variabilidad de la fabricación del concreto.

4. Eliminar la variación por iluminación. Durante el ensayo se presentaron tanto días soleados como días nublados; además de que las fotos se tomaron a distintas horas del día. Para eliminar esa variación se construyó un habitáculo iluminado (figuras 25 y 26), mediante el cual se garantizarían las mismas condiciones sin importar las condiciones climáticas o la hora de toma de imágenes. Adicionalmente, ese habitáculo mantuvo constante la distancia del sensor Tetracam a las probetas de ensayo de concreto, lo que permitió fijar el mismo enfoque y encuadre (la cámara no tiene pantalla, por lo que no se tenía certeza sobre la ubicación y enfoque de las fotos).
5. Reducir la afectación de factores externos como variaciones en la humedad y polvo. Para ello se construyeron recipientes cerrados de acrílico (figura 20)

Con estas mejoras se procedió a realizar el experimento definitivo que se presenta en este informe.

3.2 PREPARACIÓN DEL EXPERIMENTO

3.2.1 Diseño de la mezcla

Para el diseño de las 15 muestras de concreto se escogió, a sugerencia del profesor Carlos Andrés Blandón Uribe y con la experiencia del experimento preliminar, un concreto de 21 MPa usando la siguiente dosificación (Cemento – Arena – Grava) 1 – 2,3 – 2,4, con una relación agua-cemento de 0,55. Se construyeron las formaletas para vaciar 3 plaquetas de concreto en cada una, como se ilustra en la siguiente figura.



Figura 18 Formaletas para la elaboración de muestras

Fuente: Elaboración propia

Como se mencionó en la metodología, cada muestra de concreto fue realizada de manera individual garantizando la misma dosificación, estas fueron elaboradas en el laboratorio de estructuras durante 3 días diferentes haciendo uso de los equipos necesarios. En la figura 19 se puede apreciar la disposición para la elaboración de las muestras de concreto.



Figura 19. Elaboración de las muestras de concreto

Fuente: Elaboración propia.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.2.2 Preservación de las muestras de concreto

La preservación de las probetas de ensayo fue un requisito indispensable para garantizar que se encontraran protegidas de factores externos como el polvo y la humedad. Esta fue una de las conclusiones de la prueba piloto realizada en el semestre 2017-1, en la cual se presentaron variaciones en los resultados.

Para evitar los problemas mencionados y mantener las condiciones homogéneas se tomó la decisión en conjunto con el profesor Jairo Alberto Gómez Lizarazo, experto en diseño de experimentos con énfasis en control estadístico de procesos, guardar las muestras de concreto durante su fase de curado en cajas herméticas, con el fin de facilitar la interpretación de resultados (ver figura 20).



Figura 20. Cajas de acrílico para la preservación de las muestras de concreto

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, se decidió sustituir, en primera instancia, el aire con nitrógeno para controlar las condiciones de humedad al interior de las cajas de acrílico. No obstante, al realizar un modelo de prueba (figura 21), se evidenciaron diversos inconvenientes asociados al sellado de las cajas herméticamente y a la conservación del gas, por lo que se decidió, una simplificación del modelo que

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

consistió sumergir las placas de concreto en una capa de 2 cm de espesor de agua, con el fin de aprovechar la evaporación de esta para sellar las cajas.



Figura 21. Diseño de cajas herméticas, pruebas iniciales.

Fuente: Elaboración propia

Las cajas se construyeron en el Laboratorio de Metalmecánica de la Universidad EIA, donde utilizando la cortadora láser y software de diseño AutoCAD, se fabricaron cajas de acrílico de 96 cm x 35 cm x 7 cm con capacidad de almacenamiento de 3 muestras de concreto en cada una, como se muestra en la figura 22 y 23. Estas medidas estuvieron sujetas a la dimensión de corte estándar de la cortadora láser, comodidad en la colocación, traslado de las muestras y adecuado dimensionamiento para que las muestras estuvieran espaciadas a la hora de hacer el registro fotográfico.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

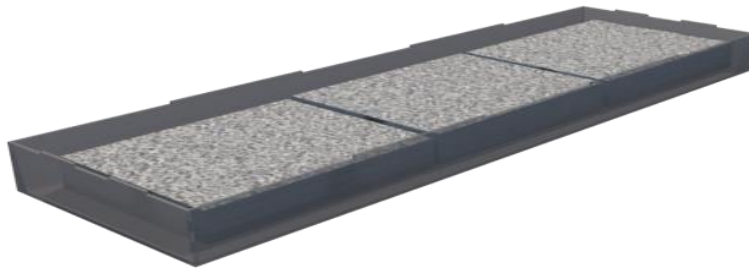


Figura 22. Diseño de cajas de acrílico

Fuente: Elaboración propia

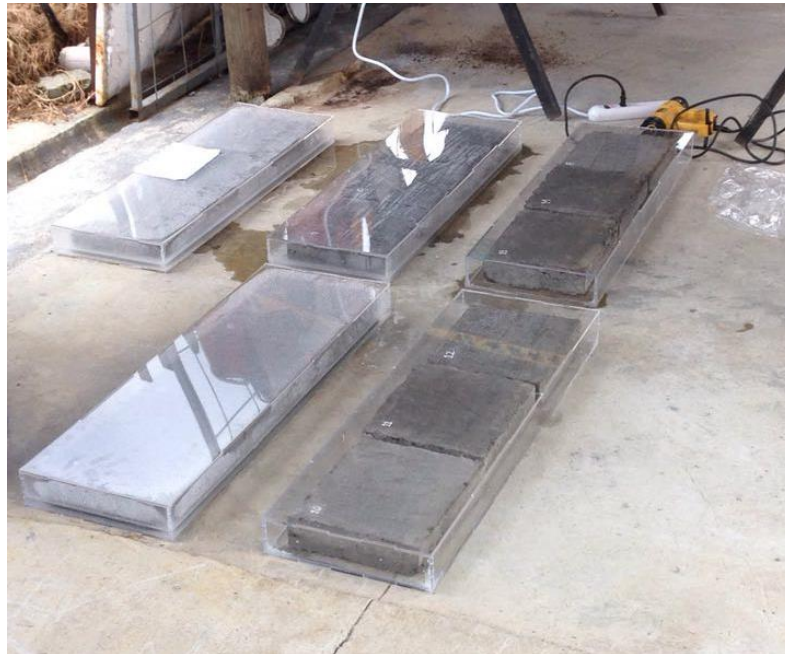


Figura 23. Cajas de Acrílicos

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Número de muestras de concreto

Cómo se mencionó anteriormente en la definición del tamaño de la muestra de los especímenes sujetos a estudio, se determinó un número de 15 muestras de concreto.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Con el fin de que las probetas de ensayo de concreto no dependan de una buena o mala preparación única de la mezcla, se optó por realizar cada mezcla individualmente, es decir, dosificar los materiales para cada una de las 15 muestras, de manera que el experimento representara la variabilidad que existe en la fabricación del concreto.

Para cada muestra de concreto se tomaron testigos, con el fin de verificar la resistencia a la compresión simple según las recomendaciones y especificaciones de la norma técnica colombiana NTC 673 (2010).

La cantidad de cilindros elaborados se determinó a partir de la NSR-10 y de los resultados obtenidos de la prueba piloto realizada en el semestre 2017-1, donde se observó que la mayor variabilidad en los datos se presentaba en los primeros 7 días de endurecimiento del concreto.

Debido a las limitaciones de espacio y problemas con el almacenamiento de los cilindros y teniendo en cuenta los resultados de la prueba piloto, se optó por realizar ensayos de compresión a los 3, 7 y 28 días, para lo cual se requieren un mínimo de 8 testigos por muestra. Se fallaron 2 probetas de cada muestra a los 3, 7 y 28 días. En caso de que el resultado entre dos probetas variara más de 10% se debía ensayar una tercera probeta. En lo posible, se intentó dejar 2 probetas de reserva para pruebas futuras.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.3 CONSTRUCCIÓN DE LA FIRMA ESPECTRAL

3.3.1 Adquisición de imágenes

Para la adquisición de las imágenes se usó una cámara multispectral Tetracam Lite sin pantalla (ver figura 24), por lo que se adaptó una de tipo LED con el fin de calibrar el enfoque y poder fijar la apertura del lente y la distancia para la toma de las imágenes.



Figura 24 Cámara multispectral

Fuente: Elaboración propia

Las muestras de concreto se ubicaron en el vivero de la universidad, donde las condiciones de luminosidad no podían mantenerse homogéneas a lo largo del experimento, por lo que se decidió cambiar la luz natural por iluminación artificial. Para ello se construyó una caja cerrada de MDF con iluminación LED al interior. Buscando, además mantener el enfoque y la distancia propia de la cámara calibrada anteriormente. (ver figura 25 y 26)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

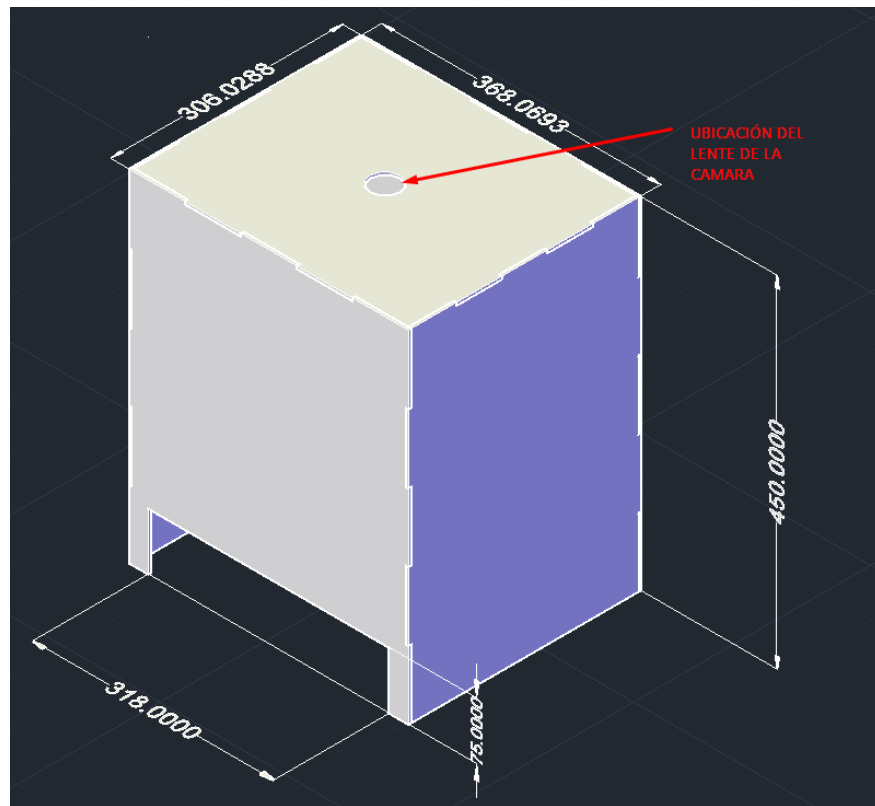


Figura 25. Modelo en AutoCAD de la base de la cámara. Medidas en mm.

Fuente: Elaboración propia

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Figura 26. Base iluminada de MDF para la toma de imágenes

Fuente: Elaboración propia.

Para el experimento se tomaron fotos de cada muestra durante 28 días, revisando la calidad de estas periódicamente mediante su descarga en el computador como se muestra en la siguiente figura.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Figura 27. Toma de fotografías

Fuente: Elaboración propia.

La cantidad de imágenes adquiridas por muestra se presenta en la tabla 5 a continuación.

Tabla 5. Numero de imágenes tomadas por muestras

Fuente: Elaboración propia

Fecha	Muestra																	
	Día	1	2	3	Día	4	5	6	7	8	9	Día	10	11	12	13	14	15
21-oct	1	X	X	X														
22-oct	2																	
23-oct	3	X	X	X														
24-oct	4	X	X	X	1	X	X	X	X	X	X							
25-oct	5	X	X	X	2	X	X	X	X	X	X							
26-oct	6	X	X	X	3	X	X	X	X	X	X							
27-oct	7	X	X	X	4	X	X	X	X	X	X	1	X	X	X	X	X	X
28-oct	8	X	X	X	5	X	X	X	X	X	X	2	X	X	X	X	X	X
29-oct	9				6							3						
30-oct	10	X	X	X	7	X	X	X	X	X	X	4	X	X	X	X	X	X

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

31-oct	11	X	X	X	8	X	X	X	X	X	X	5	X	X	X	X	X	X
1-nov	12	X	X	X	9	X	X	X	X	X	X	6	X	X	X	X	X	X
2-nov	13	X	X	X	10	X	X	X	X	X	X	7	X	X	X	X	X	X

		Muestra																
Fecha	día	1	2	3	día	4	5	6	7	8	9	día	10	11	12	13	14	15
4-nov	15	X	X	X	12	X	X	X	X	X	X	9	X	X	X	X	X	X
5-nov	16				13							10						
6-nov	17				14							11						
7-nov	18	X	X	X	15	X	X	X	X	X	X	12	X	X	X	X	X	X
8-nov	19	X	X	X	16	X	X	X	X	X	X	13	X	X	X	X	X	X
9-nov	20	X	X	X	17	X	X	X	X	X	X	14	X	X	X	X	X	X
10-nov	21	X	X	X	18	X	X	X	X	X	X	15	X	X	X	X	X	X
11-nov	22	X	X	X	19	X	X	X	X	X	X	16	X	X	X	X	X	X
12-nov	23				20							17						
13-nov	24				21							18						
14-nov	25	X	X	X	22	X	X	X	X	X	X	19	X	X	X	X	X	X
15-nov	26	X	X	X	23	X	X	X	X	X	X	20	X	X	X	X	X	X
16-nov	27	X	X	X	24	X	X	X	X	X	X	21	X	X	X	X	X	X
17-nov	28	X	X	X	25	X	X	X	X	X	X	22	X	X	X	X	X	X
18-nov	29	X	X	X	26	X	X	X	X	X	X	23	X	X	X	X	X	X
19-nov	30				27							24						
20-nov	31	X	X	X	28	X	X	X	X	X	X	25	X	X	X	X	X	X
21-nov	32	X	X	X	29	X	X	X	X	X	X	26	X	X	X	X	X	X
22-nov	33				30							27						
23-nov	34	X	X	X	31	X	X	X	X	X	X	28	X	X	X	X	X	X
24-nov	35	X	X	X	32	X	X	X	X	X	X	29	X	X	X	X	X	X

3.4 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

3.4.1 Extracción de datos

Para iniciar con el procesamiento de las imágenes primero se utilizó el software PixelWrench2 de Tetracam con el fin de pasar las imágenes del formato *.RAW a una imagen de las bandas Green, Red y Nir en el formato *.TIF, como se aprecia en la siguiente figura.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

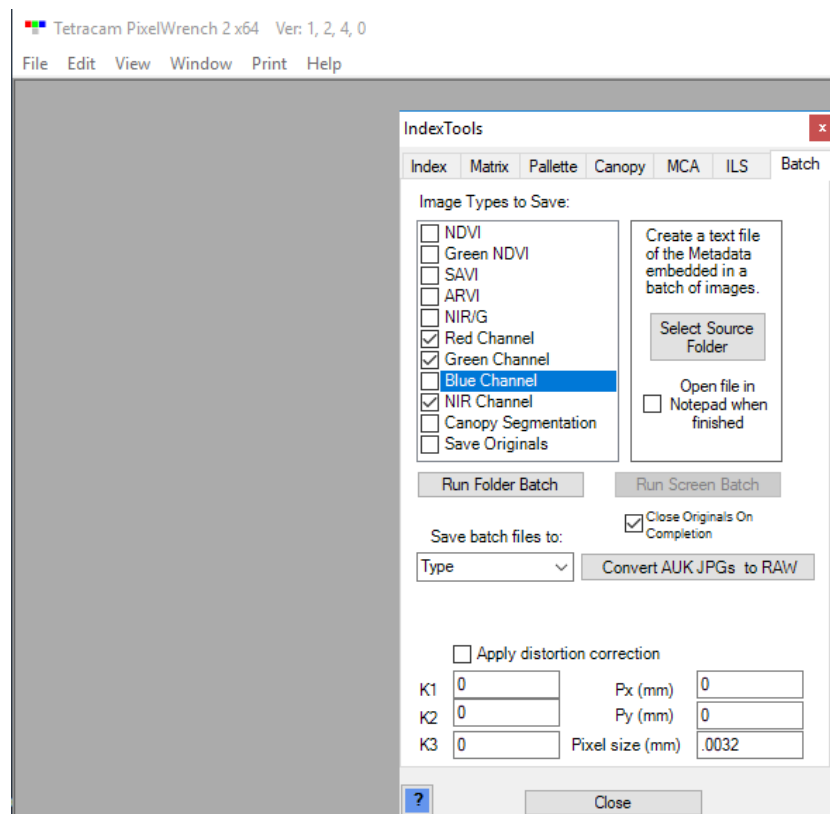


Figura 28. Conversión de Formatos en PixelWrench2.

Fuente: Elaboración propia

Una vez realizada la conversión de formato, se guardó cada banda en una carpeta por aparte con su respectivo nombre. Debido a que los valores de cada pixel de las imágenes estaban almacenados en una escala de números digitales (ND) de 0 a 255, se usó el software ArcMap para realizar un modelo para transformar los ND en valores de reflectancia en la escala de 0 a 1. La reflectancia es un indicador del porcentaje de energía reflejada por un material, donde los valores 0 y 1 corresponde con el 0 % y el 100 %, respectivamente.

A continuación, se explica el paso a paso que se realizó para el procesamiento de la información.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.4.2 Convertir de entero a flotante

Debido a que el formato TIF los valores de la reflectancia está en números enteros y no en decimales, se usó la herramienta *Raster to Float* para transformar una imagen del formato *.TIF a un raster con formato flotante (*.FLT). Con el fin de automatizar el proceso se usó la herramienta *ModelBuilder* para realizar una rutina de procesamiento. (Figura 29)

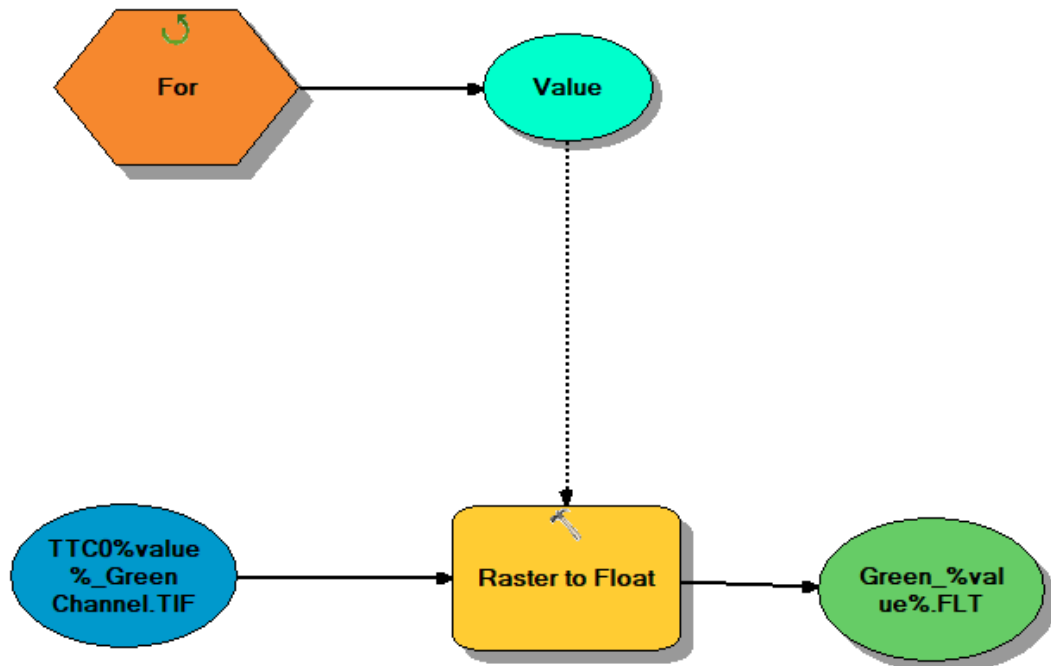


Figura 29. Modelo para convertir la información a formato flotante.

Fuente: Elaboración propia

En dicho modelo se usó un ciclo *for* para seleccionar los archivos que debían ser convertidos de formato.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.4.3 Estimación de la reflectancia

En el manual de la cámara multispectral se indica que el 0 corresponde al 0% de reflectancia y que el 255 al 100%. Por lo cual, para pasar los números digitales a valores de reflectancia se usó la herramienta *Raster Calculator* para dividir cada pixel entre 255 y obtener valores de 0 a 1. (Figura 30)

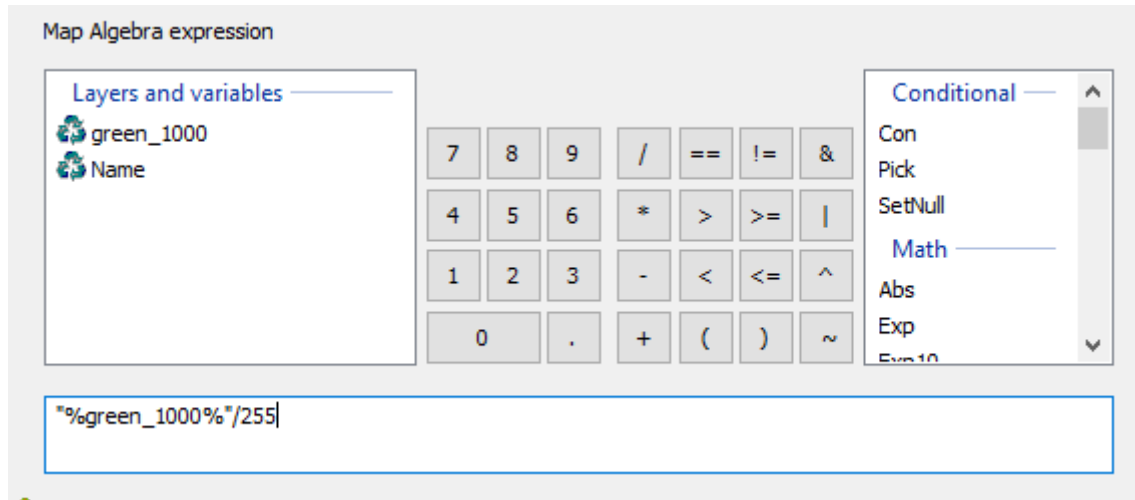


Figura 30. Operación para estimar los valores de reflectancia

Fuente: Elaboración propia

De la misma manera, se realizó un modelo para automatizar el proceso. (Figura 31)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

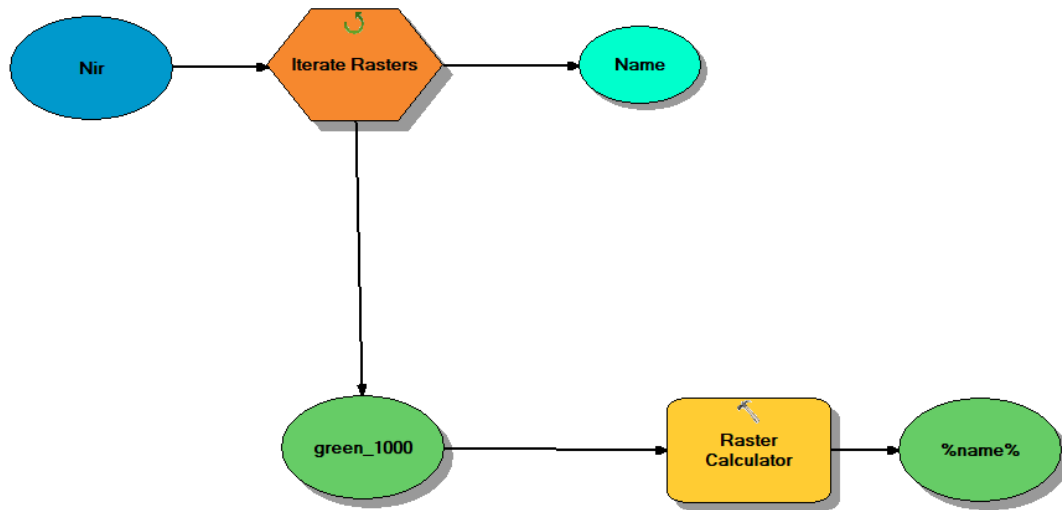


Figura 31. Macro para cambiar de escala

Fuente: Elaboración propia.

Después de realizar estos procesos se obtuvieron imágenes como la siguiente (ver figura 32), donde cada pixel tiene un valor de 0 a 1 que se conoce como reflectancia.

En esta figura se puede apreciar un valor de reflectancia correspondiente a 0.835, lo cual indica que emite un 83.5% de la luz que le llega.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

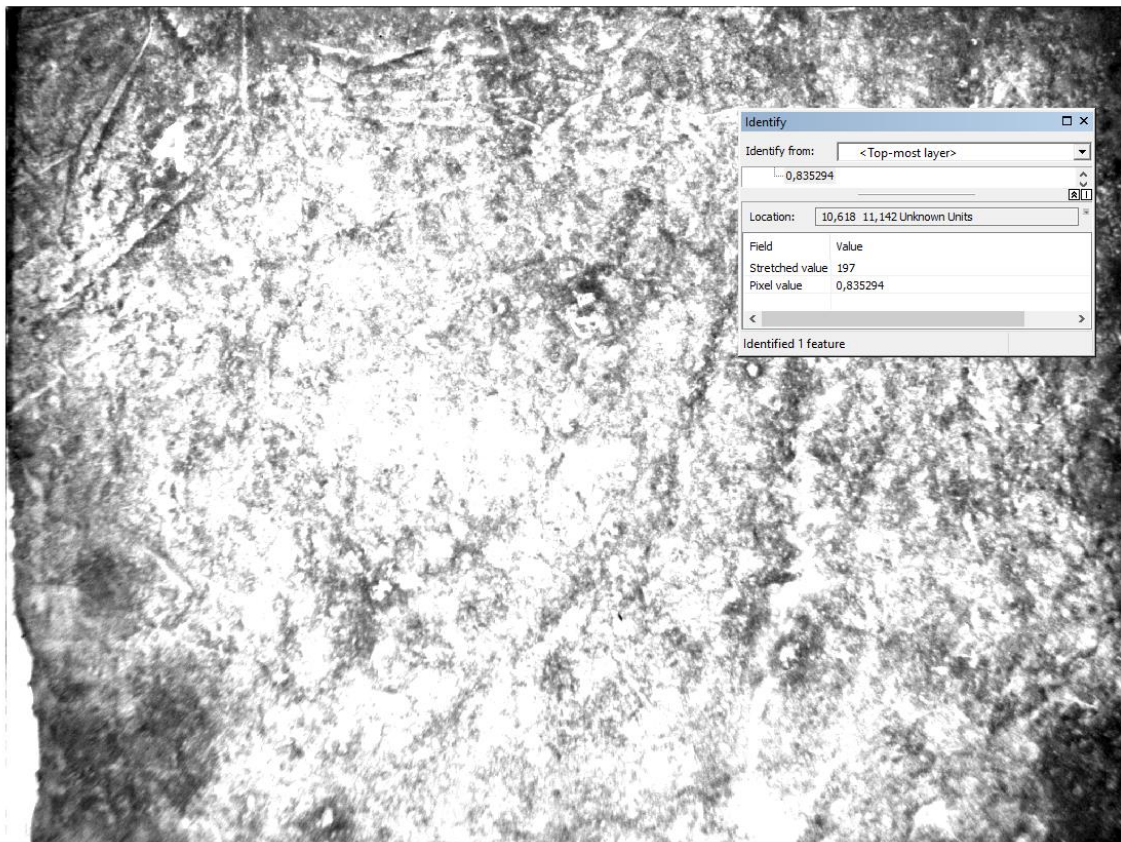


Figura 32. Muestra de concreto con sus respectivos valores de reflectancia

Fuente: Elaboración propia

3.4.4 Extracción de información para análisis estadístico

Una de las oportunidades de mejora identificadas en el proyecto piloto fue la necesidad de contar con más información para el análisis estadístico. En el proyecto piloto se extrajo el promedio de reflectancia de cada muestra, lo cual arrojó un valor poco representativo de toda la superficie, la cual, como se indicó anteriormente, fue afectada por factores externos como polvo.

En el segundo experimento se evitaron estas interferencias, lo que permitió obtener mayor cantidad de información. Se tomó la decisión de extraer un valor de reflectancia cada medio centímetro dejando un borde de 1 cm, lo que originó que se tuvieran más de 1000 valores para cada día, para cada banda espectral y para cada muestra. Esto produjo una base de datos de más de 1,25 millones de valores. (Figura 33)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

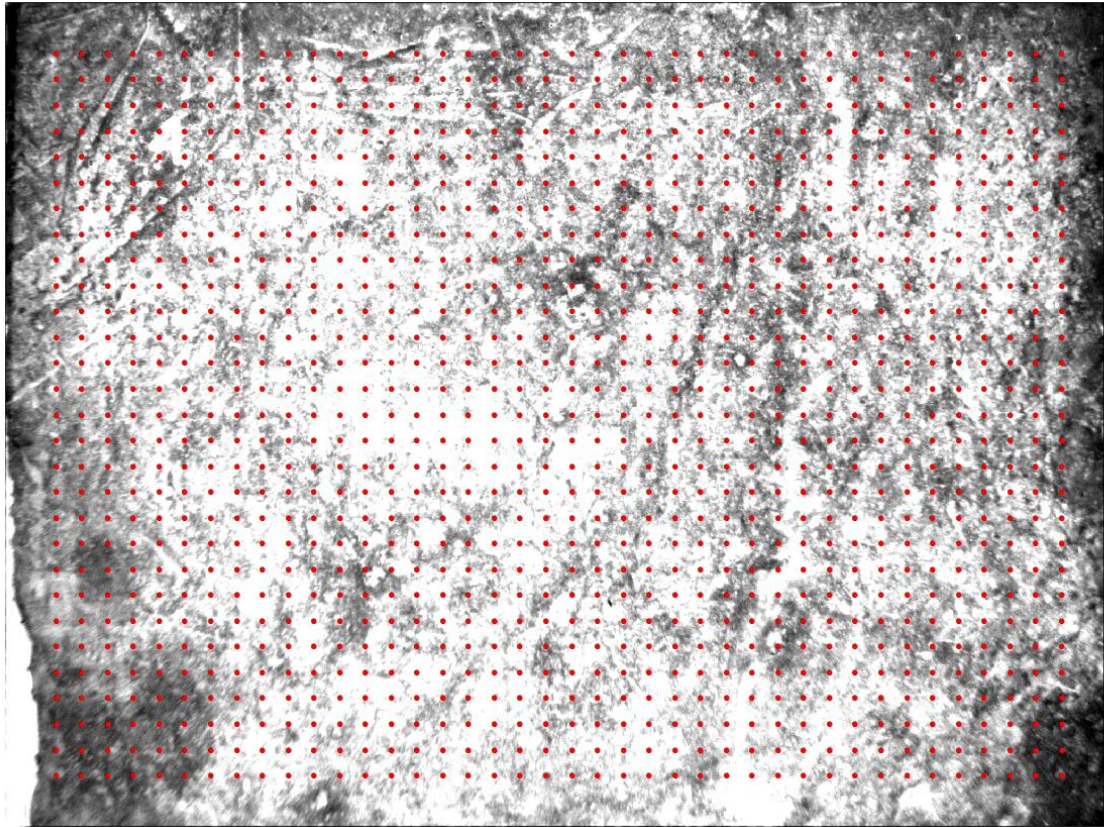


Figura 33. Puntos de extracción de reflectancia

Fuente: Elaboración propia

Para esto se usó la herramienta *Extrac Values To Points*. Como se muestra en la siguiente figura.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

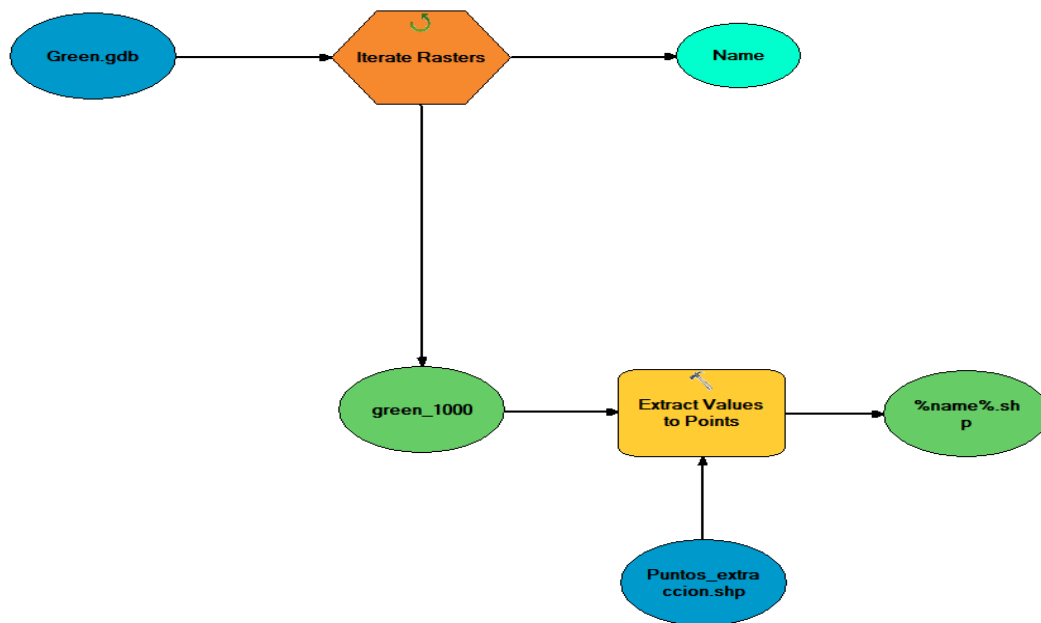


Figura 34. Modelo para la extracción de puntos

Fuente: Elaboración propia.

3.5 CONVERTIR A ARCHIVOS DE EXCEL

Finalmente, se usó la herramienta *Table to Excel* para pasar los valores de cada punto a un archivo de Excel. (Figura 35)

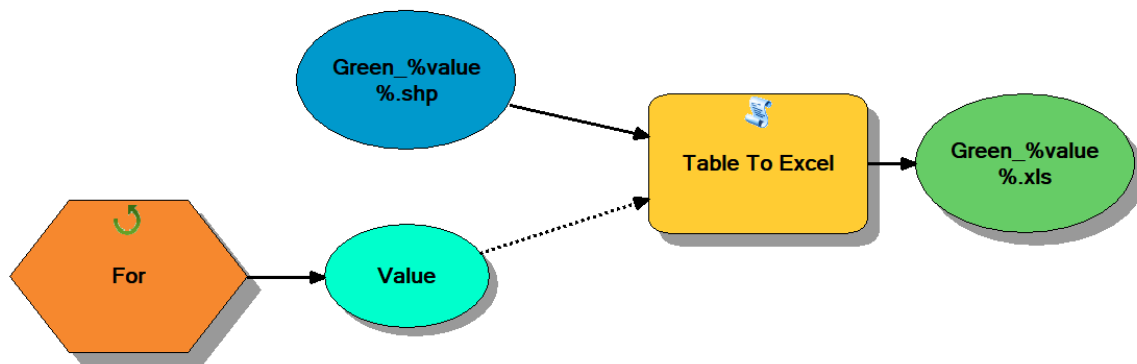


Figura 35. Modelo para pasar los puntos a archivos de Excel

Fuente: Elaboración propia

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.6 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Se realizó el análisis de la información en el software de programación y gráficos estadísticos R con apoyo de la M.I. Ann Wellens del Posgrado en Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Se leyeron un total de 1083 archivos de entrada en formato .csv, correspondientes a las 361 fotos en cada una de las bandas GREEN, RED y NIR. Para cada archivo se extrajo la información del número de muestra de concreto a la que corresponde cada foto, el día consecutivo en el proceso de endurecimiento del concreto al que corresponde la muestra, la banda de análisis y, finalmente, el número de foto al que corresponde la información.

Se graficó la información contenida en cada archivo mediante la función *persp3D* del paquete *graphics* disponible en R, generando un total de 1083 fotografías (figura 36). Cabe mencionar que la foto 1059 mostró un comportamiento inesperado en la imagen resultante, por lo que fue eliminada del análisis, quedando 1080 elementos de análisis. Asimismo, se observó un comportamiento inesperado en un rango de fotos en la banda NIR; sin embargo, este análisis de errores detectó un error de procesamiento en un paso anterior, que pudo ser corregido.

Al realizar el registro fotográfico y analizar los respectivos valores de reflectancia, se encontraron que los valores hacia los extremos de la muestra tenían una mayor variabilidad que los valores en la mitad (ver figura 36), por lo que se repitió procesamiento recortando el tamaño de las muestras en 2 cm, con el fin de obtener un valor de desviación estándar más pequeño con una distribución más uniforme de los valores.

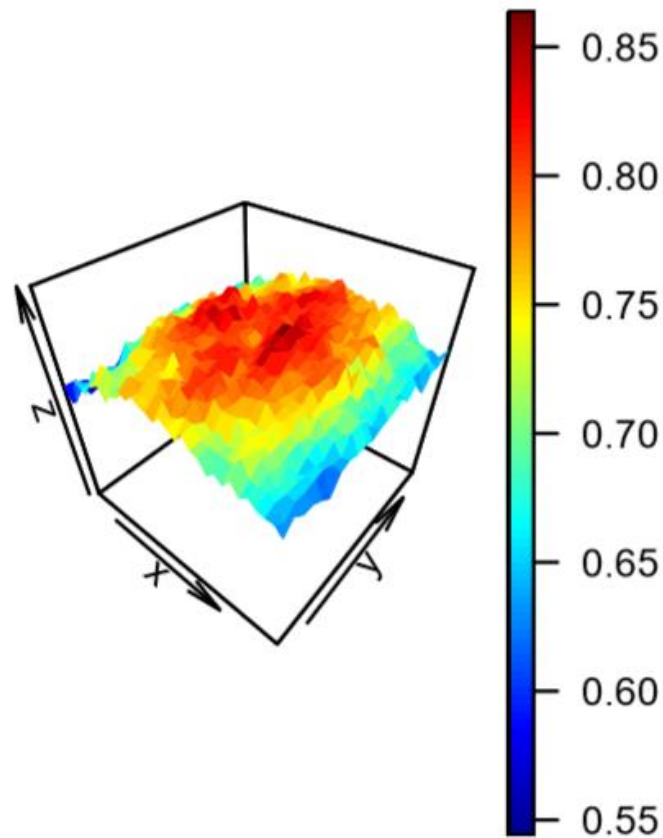


Figura 36. Distribución espacial de los valores de reflectancia de una muestra de concreto, banda Green

Fuente: Wellens (2018) con datos de reflectancia de este trabajo

El análisis de datos se desarrolló tomando los promedios de reflectancia en función del número de días transcurridos desde la fabricación de las muestras, para las bandas Green, Red y NIR. Estas muestras se realizaron en 3 días distintos, por lo que se analizaron en bloques que corresponden a los días de fabricación

Finalmente, estimando la media y desviación estándar de la reflectancia se pudo determinar el intervalo de confianza correspondiente para cada día. Se generaron graficas con esta información para cada banda, en donde la línea azul corresponde al valor promedio de reflectancia en función del número de días de endurecimiento del concreto y el área gris corresponde al intervalo de confianza al 95%. En las figuras 37, 38 y 39 se observan las gráficas obtenidas del análisis.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Green

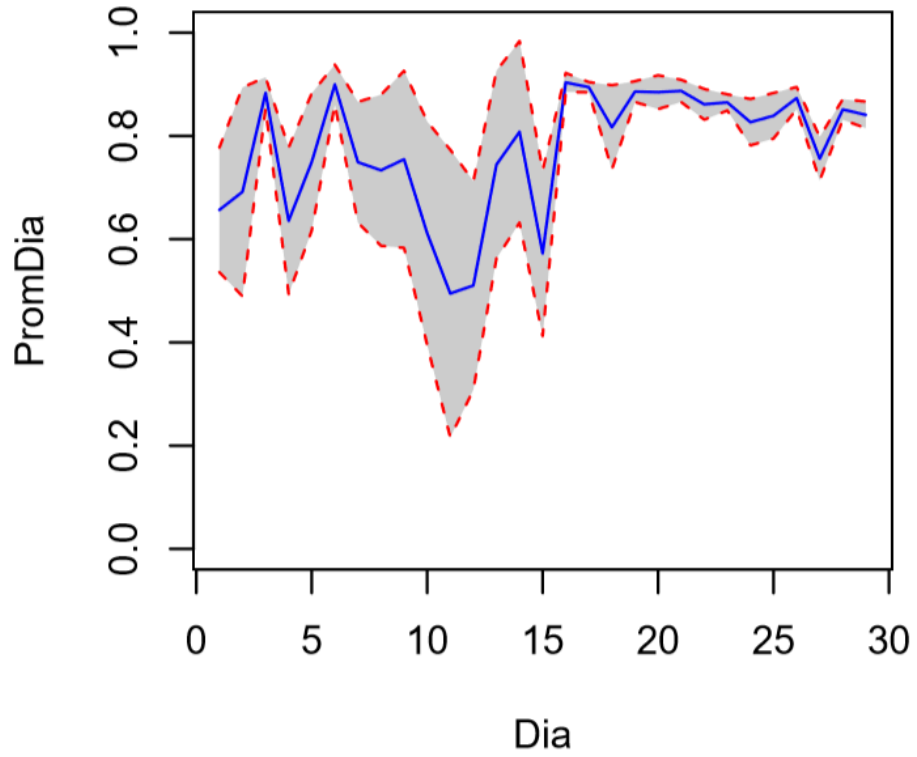


Figura 37. Valores promedio e intervalo de confianza al 95% de la banda Green

Fuente: Wellens (2018) con datos de reflectancia de este trabajo

Red

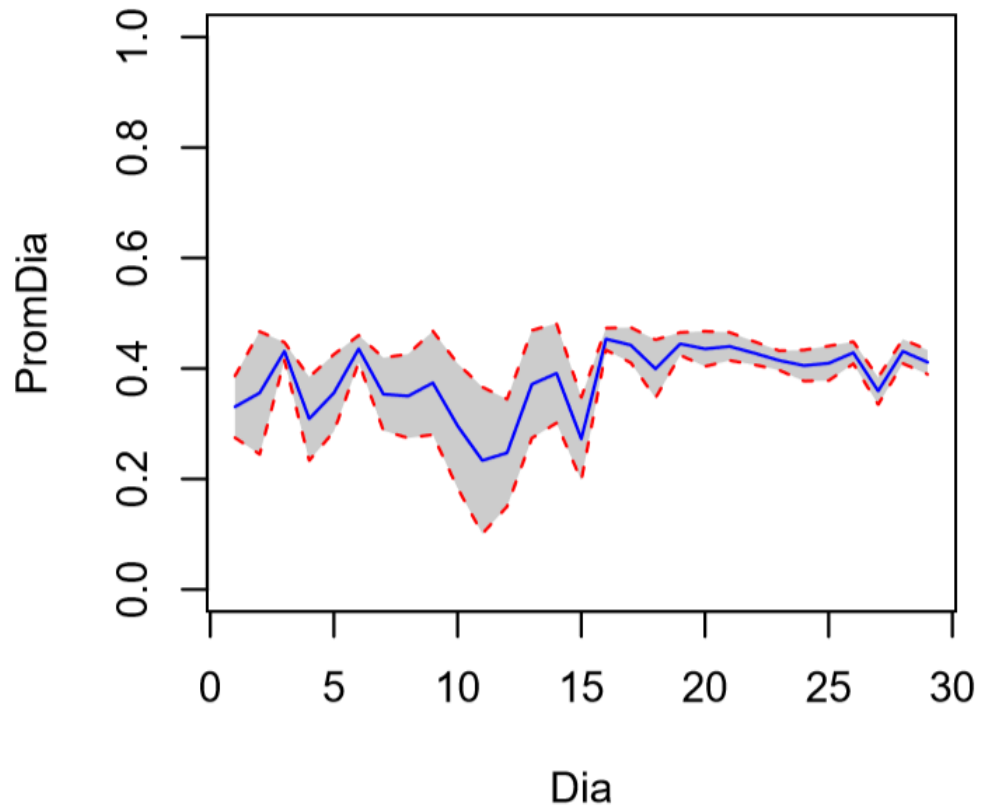


Figura 38. Valores promedio e intervalos de confianza al 95% de la banda Red

Fuente: Wellens (2018) con datos de reflectancia de este trabajo

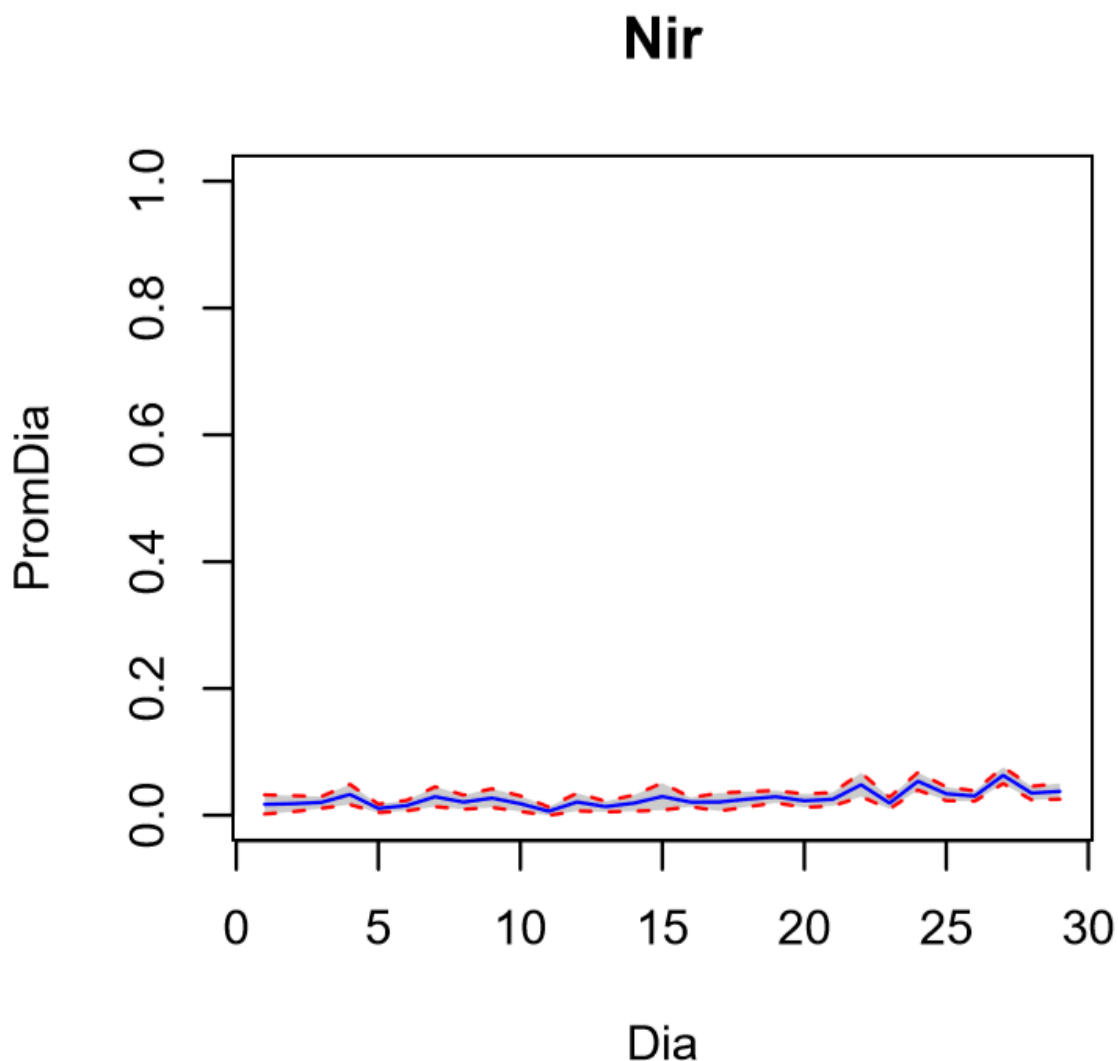


Figura 39. Valores promedio e intervalo de confianza al 95% de la banda Nir

Fuente: Wellens (2018) con datos de reflectancia de este trabajo

En las figuras 37 y 38 se nota una similitud entre la banda Red y la Green, donde hay una variación en el comportamiento de la reflectancia en los primeros 15 días y luego de un incremento la estabilización de los valores. Sin embargo, en la gráfica Nir los valores de reflectancia son bajos y no hay relación con las otras dos bandas. Lo anterior se debe a que la luz LED utilizada no tiene ese ancho de banda en su espectro, como se puede apreciar en la siguiente figura que muestra la cantidad de luz emitida en cada banda por diferentes tipos de iluminación.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

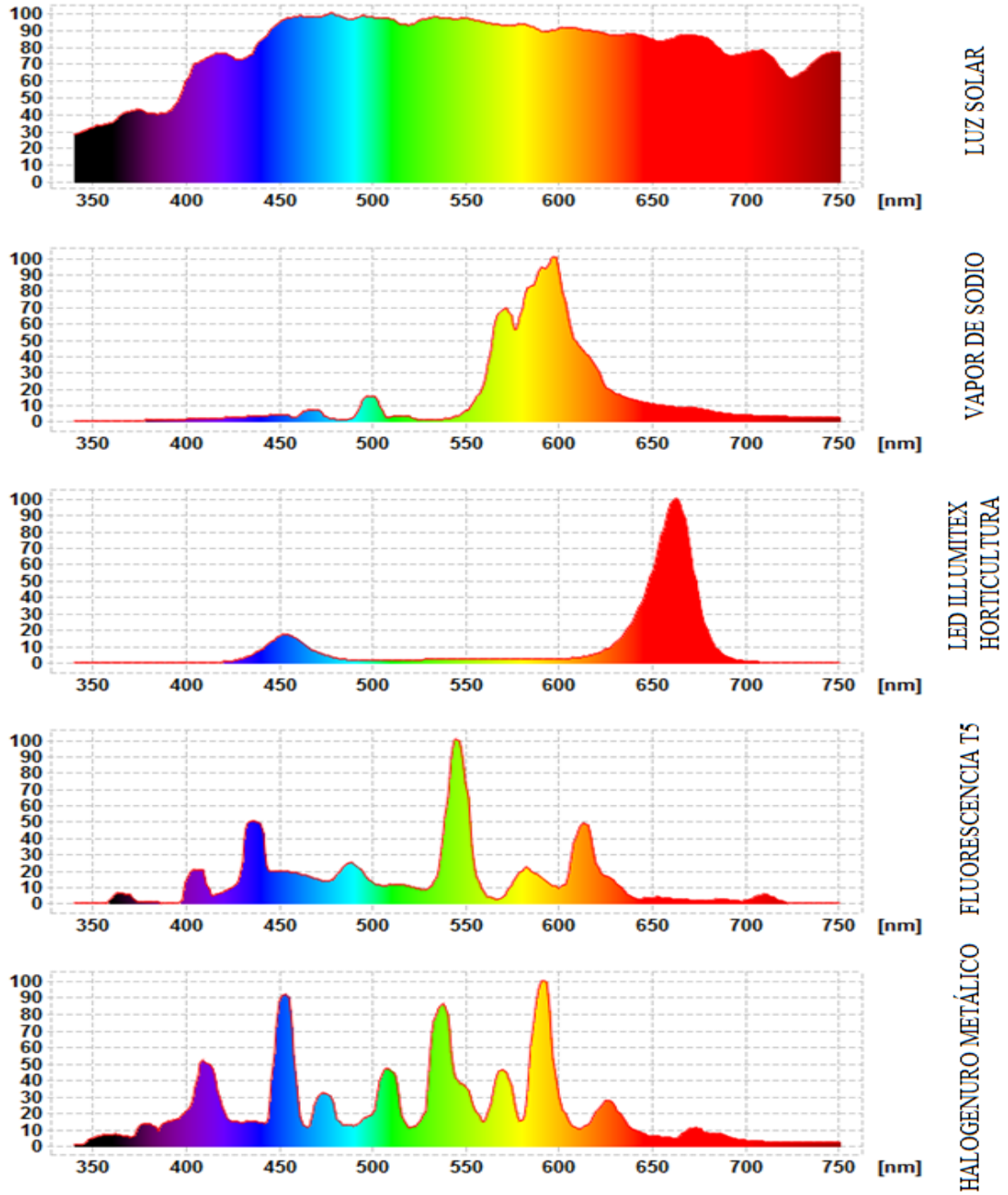


Figura 40. Cantidad de luz emitida en cada longitud de onda según el tipo de iluminación

Fuente: ZelulaZero (2017)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.7 ENSAYOS DE COMPRESIÓN DE LOS CILINDROS DE CONCRETO

La figura 41 muestra los resultados del promedio de las resistencias a la compresión a los 3, 7 y 28 días de curado de las 15 muestras sometidas a estudio. Se logra ver que las últimas 5 muestras presentan una variabilidad menor en torno a la resistencia planteada de manera inicial correspondiente a 21 MPa.

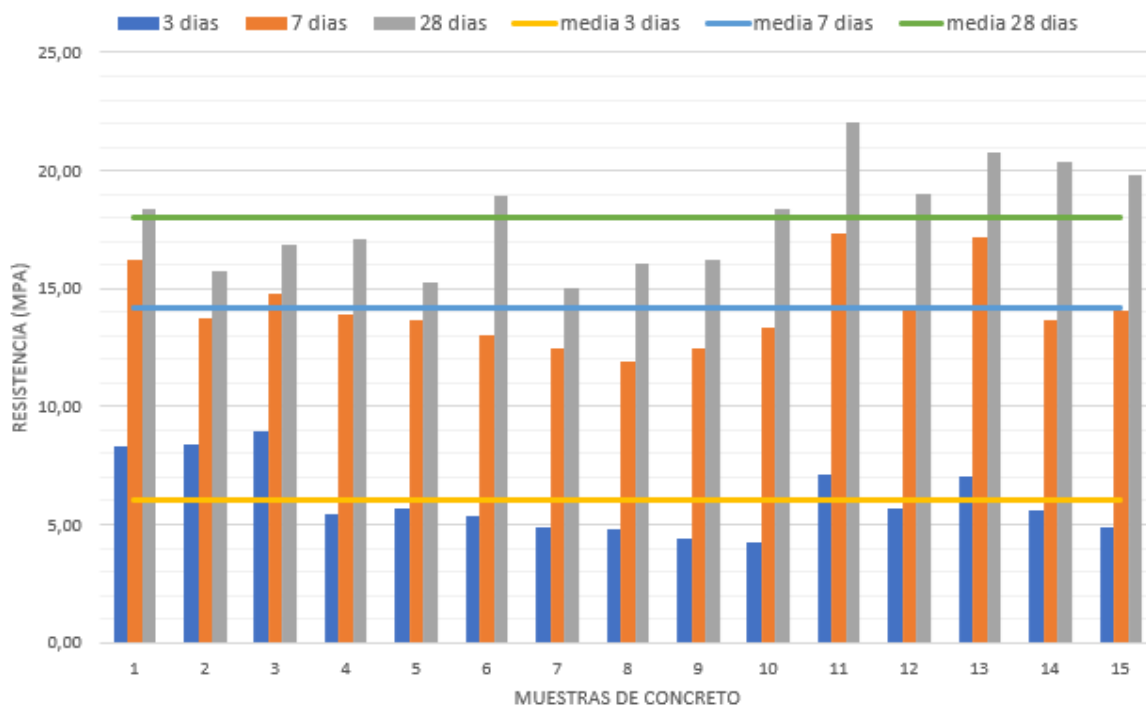


Figura 41. Promedio de la Resistencia a la compresion de los cilindros de concreto para cada muestra.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 41, se puede observar una variación donde los cilindros de las 3 primeras muestras a los 3 días tienen una mayor resistencia que los cilindros de las demás muestras a la misma edad, esto pudo deberse a que en los días en que se realizó el vaciado llovió y no se realizó la corrección de humedad en las muestras intermedias todo lo contrario de las 5 últimas muestras que se mantienen más estables sobre el valor medio; El nivel de dispersión de los datos oscila entre 1,68 MPa y 2,34 MPa. El valor máximo adquirido de resistencia a los 3, 7 y 28 días es de 8.96 MPa, 17.37 MPa y 22.08 MPa respectivamente.

En la figura 42, se muestra los valores de reflectancia vs la resistencia del concreto, donde el número de días corresponde al tiempo de fraguado de las muestras de concreto.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

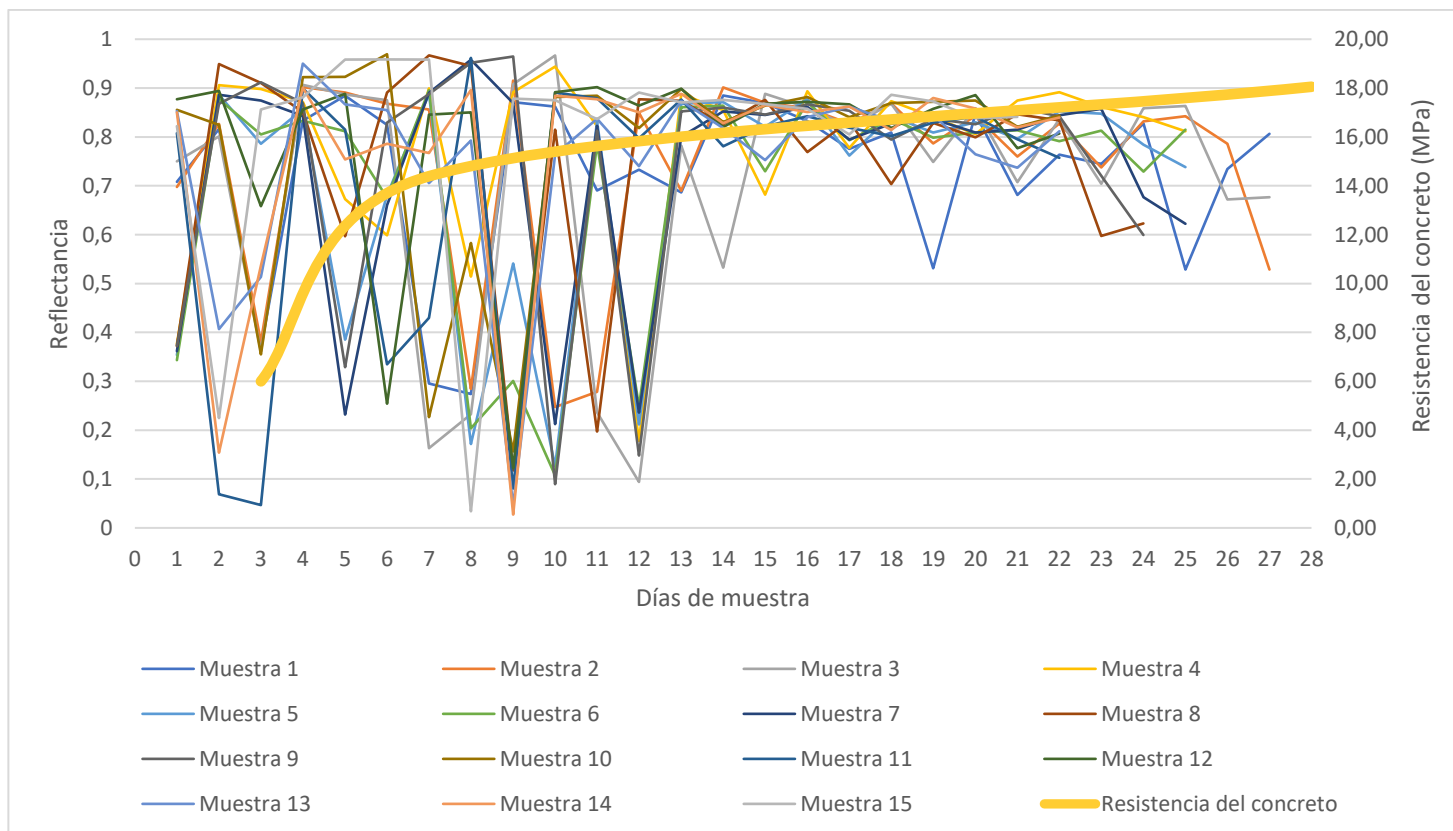


Figura 42. Reflectancia Vs Resistencia del concreto del día 1 al 28. Banda Green.

Fuente: Elaboración propia

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

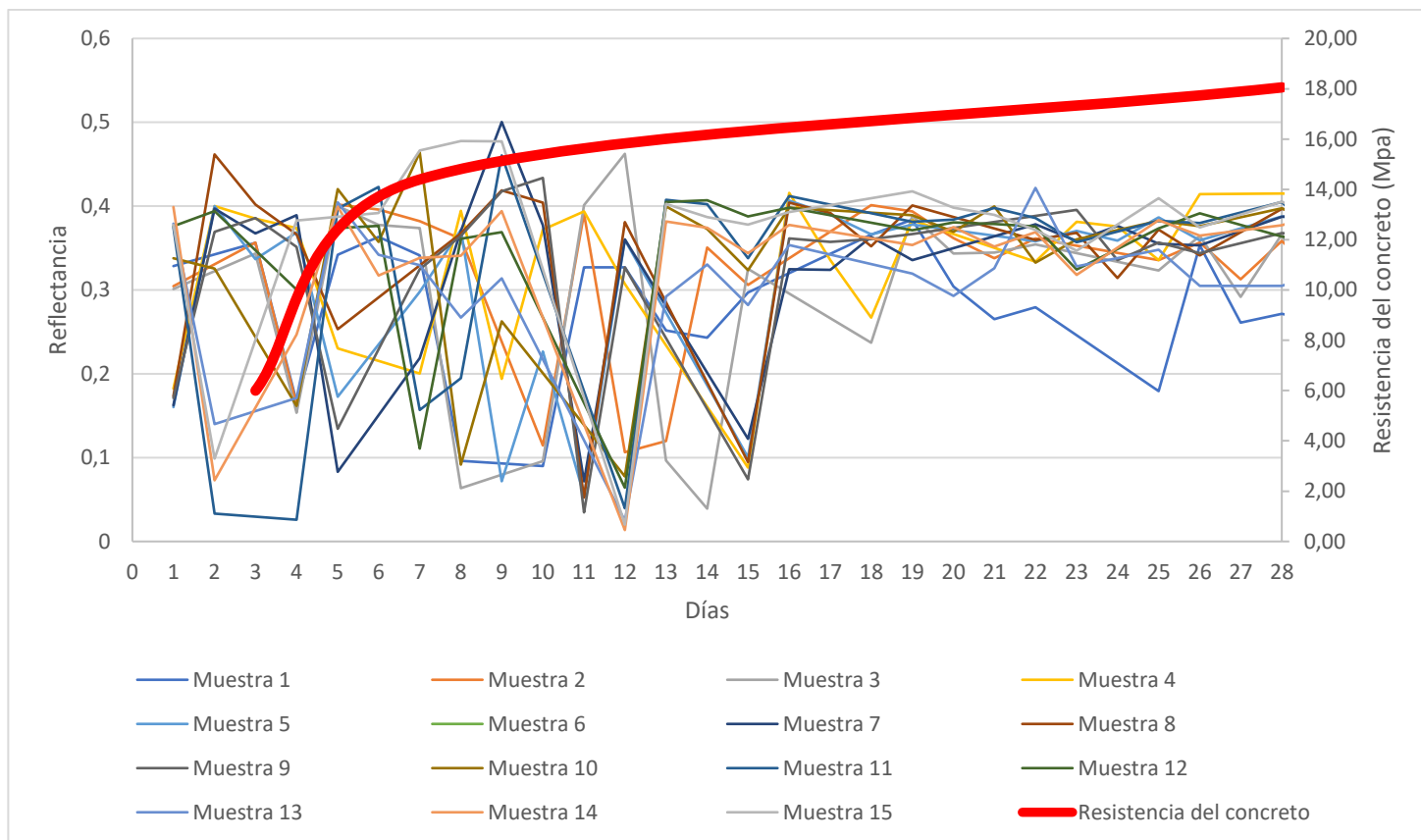


Figura 43. Reflectancia Vs Resistencia del concreto del día 1 al 28. Banda Red.

Fuente: Elaboración propia

En las figuras 42 y 43 se observa que en los primeros días de curado hay una variabilidad importante en la reflectancia y se estabiliza en los días restantes. Además, se observa que en las gráficas obtenidas en las pruebas piloto (figuras 15,16,17 y 18), el pico más bajo de reflectancia corresponde al día número 8 de curado mientras que en las gráficas obtenidas en condiciones controladas (figuras 42 y 43) el pico más bajo se observa a los 12 días. Lo que podría indicar que en el concreto que se encuentra en obra, expuesto a la intemperie, el valor más bajo de reflectancia se da más rápido que en las muestras que se encuentran en condiciones de laboratorio.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de las gráficas obtenidas de reflectancia vs tiempo de curado del concreto (figuras 37, 38 y 39) se puede observar, de manera clara, que la banda Red es la misma que la banda Green con valores de reflectancia más bajos. La banda Nir no sigue el comportamiento de las otras 2 bandas y presenta valores muy bajos a comparación de las demás bandas.

En la figura 44 se puede observar que en la longitud de onda que corresponde al Nir el concreto presenta una reflectancia cercana al 30%, sin embargo, en los resultados obtenidos (figura 40) este valor de reflectancia es siempre inferior al 10%, resultado que se cree asociado al uso de iluminación LED, debido a que fue un factor diferenciador en comparación a experimentos previos como el de (Shaban, 2013), en el cual se utilizó una fuente de iluminación natural.

La diferencia de reflectancias entre las figuras (39 y 44) podría deberse principalmente como ya se mencionó a las condiciones de iluminación utilizadas, puesto que esta variación cambia las emisividades y por ende las bandas de reflexión, teniendo en cuenta que al haber simplificado la fuente de iluminación a un LED el espectro analizado no es igual al de la iluminación solar.

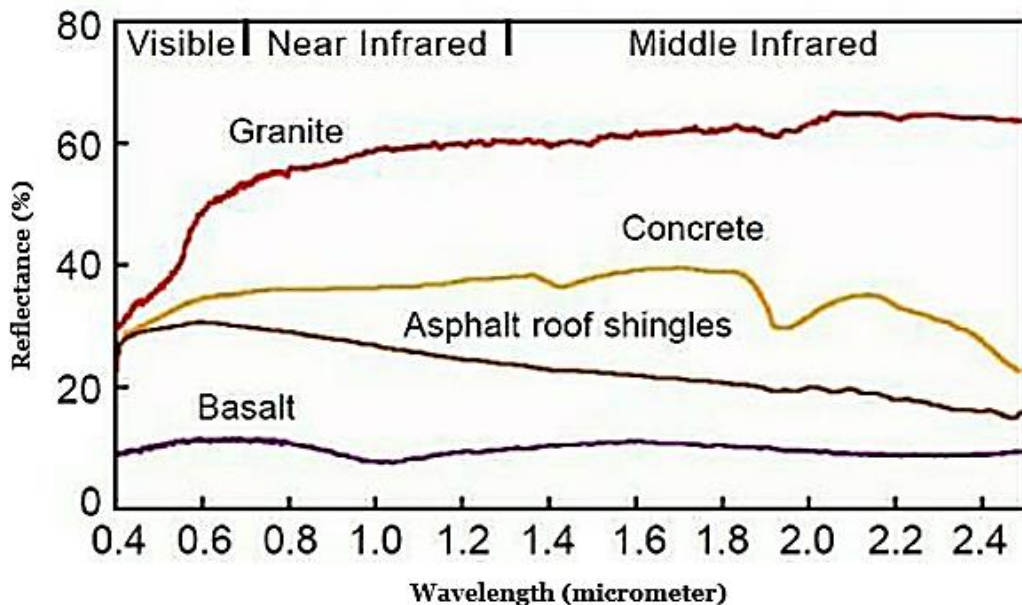


Figura 44. Firma espectral del concreto y otros materiales pétreos

Fuente: Shaban (2013)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

De acuerdo con el comportamiento de las figuras (37 y 38) de reflectancia en las bandas Green y Red, se distinguen cambios bruscos en los primeros 15 días, seguidas de un incremento y una posterior estabilización.

Según (Giraldo & Tobón, 2006) , este comportamiento se debería a una posible reacción química que tiene lugar durante el fraguado del concreto, debido a que en este periodo se forman cristales responsables del endurecimiento de la mezcla, que consumen agua bajando la reflectancia, es decir, que la reflectancia es menor conforme menor sea el contenido de humedad del concreto en estado sólido.

En esta misma línea de ideas (Giraldo & Tobón, 2006), plantean una relación entre la reflectancia y la resistencia sugiriendo que el aumento en la resistencia mecánica de un concreto es consecuencia de la formación de geles que luego se transforman en cristales de fases cerámicas y minerales complejas de alta dureza, durante las reacciones de hidratación que tienen lugar en el proceso de curado del concreto.

En los primeros días del curado la cantidad de agua disponible es alta y se combina con geles hidratados que reflejan mucha luz, conforme el calor exotérmico de reacción, es decir, calor de hidratación es liberado, se libera agua en su estado vapor (el cual por si mismo tiene una emisividad y reflectancia diferente a la del agua en estado líquido) se reduce el nivel de reflectancia del concreto.

Para entender este comportamiento, es necesario conocer los aspectos químicos involucrados en la etapa de hidratación del cemento Portland de la cual depende en gran medida la calidad de unión de la masa cementante.

Entendiendo que en el proceso de hidratación del cemento tiene lugar una consolidación correspondiente al paso de un sistema inicialmente líquido o plástico a un estado sólido, el cual se presenta en dos etapas , una de fraguado y otra de endurecimiento, produciéndose primero el fraguado en el cual se genera un material sólido que va tomando resistencia gradual durante la etapa de endurecimiento (Labahn, 1985).

En consonancia por lo especificado por Kostmatka, et al (2003) y Gabalec & Barreda (2008) en la hidratación, y por lo tanto en la consolidación de la masa cementante, se forman procesos de diversa naturaleza, entre los que se destacan:

- Reacciones químicas que se generan principalmente en la etapa de hidratación del cemento Portland, cuyo peso está constituido en aproximadamente un 90% por los siguientes compuestos:
 - Silicato tricálcico
 - Silicato dicálcico

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Aluminato tricálcico
- Ferro aluminato tetracálcico

Resaltando que, de todos los componentes principales, los silicatos suman del 60 al 80 % del total del peso, que al reaccionar con agua forman dos compuestos conocidos como: hidróxido de calcio e hidrato de silicato de calcio, siendo este último el compuesto más importante ya que de él dependen en gran medida propiedades como el endurecimiento, la resistencia y la estabilidad dimensional.

Además de estas reacciones químicas generadas, durante la hidratación, y por lo tanto en la consolidación de la masa cementante, también se forman los siguientes procesos:

- Procesos de disolución y cristalización, en los cuales se forman nuevos compuestos hidratados de naturaleza geliforme o cristalina, a partir de disoluciones sobresaturadas y por procesos topoquímicos.
- Procesos interfaciales en los que las fuerzas de atracción entre superficies producen la unión de los compuestos constituyentes de la pasta.

Sin embargo, estas reacciones ocurren de manera simultánea, aunque de manera más fuerte en los primeros días del curado mientras que el concreto gana la mayor parte de la resistencia.

Para las ilustraciones 43 y 44 no se puede determinar una correlación entre la reflectancia y la resistencia del concreto a causa de que no hay suficientes datos a lo largo del curado del concreto. Sin embargo, se puede observar que la ganancia de resistencia del concreto entre el día 7 y el día 28 es del 21% y que después del día 15 los valores de reflectancia tienen una variabilidad mucho menor, por lo que se puede deducir que hay una relación proporcional entre la ganancia de resistencia y la variabilidad de los valores de reflectancia en el concreto. Lo que indica que entre mayor sea la ganancia de resistencia del concreto en un periodo de tiempo mayor será la variabilidad de los valores de reflectancia en el concreto.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

La posibilidad de llevar a cabo una prueba piloto demostró ser determinante para el éxito de este proyecto. Mediante su realización se pudo ajustar el experimento en cuanto al número de muestras y el control de su preservación, como la cantidad de luz incidente al momento de tomar las imágenes multispectrales o la estabilización de la humedad en el entorno de las muestras.

Estos hallazgos demandaron actividades no consideradas originalmente en el anteproyecto, como la construcción de contenedores o cajas iluminadas para la toma de imágenes.

La prueba piloto también permitió apreciar la variabilidad de los resultados, con lo que se pudo establecer la necesidad de analizar solo un diseño de mezcla de concreto y mantener un control sobre la relación agua/cemento. A pesar de ello, no se logró compensar totalmente la variación de humedad en los agregados debido a las condiciones ambientales que tuvo lugar durante la elaboración de las mezclas de concreto, ya que no todas las resistencias de los cilindros cumplieron con la resistencia de diseño.

En lo que respecta a las respuestas espectrales del concreto, fue patente la dificultad para analizar un material de naturaleza heterogénea como el concreto, el cual puede ser afectado por diversos factores, desde la temperatura bajo la cual tienen lugar las reacciones químicas de endurecimiento, hasta la rugosidad que haya presentado la superficie de la muestra fotografiada.

Se podría realizar el análisis con solo la banda Green o la banda Red debido a que estas graficas siguen el mismo comportamiento.

Realizando un seguimiento a la formación de cristales en el concreto y usando las graficas de reflectancia vs el número de días se puede hacer una identificación de las fases de curado del concreto y con su ganancia de resistencia.

No obstante, resultó evidente que los primeros 15 días de endurecimiento del concreto tiene lugar la formación de cristales, los cuales son los responsables del proceso de consolidación, lo que reduce la cantidad de agua en la mezcla y, en consecuencia, la reflectancia. Al finalizar este periodo de endurecimiento la reflectancia se estabiliza, lo que coincide también con una estabilización en la ganancia de resistencia del concreto.

A pesar de que estos resultados no son concluyentes, se considera que muestran una tendencia clara durante dos fases de endurecimiento de concreto, lo que, con

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

una mayor cantidad de información, podría derivar en firmas características con las cuales predecir su resistencia final.

En cuanto al objetivo general del trabajo, se puede concluir que el número de datos analizado, el cual fue acotado por el tiempo disponible para realizar este trabajo, no permite verificar que exista una relación entre la respuesta espectral y la resistencia del concreto. No obstante, como se mencionó anteriormente, existen indicios que sugieren comportamientos característicos de la muestra, antes del día 15 de endurecimiento y después de éste, lo que podría motivar nuevas investigaciones que complementen los resultados de esta investigación.

A pesar de que el objetivo general no se cumplió, este trabajo deja abierta muchas otras aplicaciones de este método, como la identificación de las fases de curado por medio del análisis espectral y el seguimiento a la calidad del curado en el concreto.

9. RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES

Las oportunidades de mejora se encontraron en dos aspectos, la primera orientada a la preparación y mezcla de las muestras de concreto y la segunda enfocada en el diseño, materiales y entorno en el que se desarrollan y preservan las muestras.

Preparación y mezcla de concreto:

En la parte de elaboración de las muestras se recomienda un monitoreo y control constante de la corrección por humedad de la mezcla, normalizando los procesos de dosificación de mezcla, condiciones de vaciado y curado de las probetas, reduciendo la variabilidad de las mediciones a efectuar. Este monitoreo se hizo efectivo en las últimas 5 muestras sujetas a corrección por humedad en las cuales se obtuvieron resultados más cercanos a lo esperado.

En esta misma línea de ideas, se encontraron falencias en el laboratorio de estructuras donde se realizó el vaciado de las muestras a nivel de infraestructura e instrumentación generando posibles errores de calibración, medición y calidad final de las muestras.

Se identificó también, la necesidad de mejorar la superficie de las placas disminuyendo el área o la altura, lo que podría crear condiciones más aptas para la fase de registro fotográfico, puesto que en un análisis detallado de las imágenes se encontró mayor dispersión en los bordes superficiales de la muestra, obteniendo mayor focalización del área central, teniendo en cuenta que las técnicas que involucran caracterizaciones con luz absorbida, transmitida o reflejada no solo son afectadas por la condición superficial de las probetas de ensayo sino también por fenómenos de refracción y difracción que desvían los haces de luz o atenúan la

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

intensidad del haz de luz reflejado, y esto está asociado al polvo flotante en aire y formación de películas de vapor que por su flujo convectivo distorsionan la luz. Por lo que próximos montajes experimentales deberían considerar un vaciado primario.

Finalmente, a nivel estadístico, es necesario aumentar el número de cilindros para los ensayos a compresión, lo que podría disminuir el error, aumentando el nivel de confianza de las muestras, teniendo en cuenta que el número escogido se determinó de acuerdo con los recursos de tiempo y dinero disponibles para el trabajo de grado.

Diseño, material y entorno:

Entre los aspectos de mejora, se encontró la necesidad de reevaluar el espesor del material de las cajas de acrílico en el que se preservaron las muestras, debido a separaciones en las uniones debido al peso de estas, con el fin de garantizar un aislamiento óptimo en la experimentación.

En cuanto a la construcción de las cajas de acrílico se presentaron errores de medición en el corte realizado en la cortadora láser, lo que implicó cortes adicionales manuales para lograr el cerramiento.

Finalmente, se presentaron pérdidas del nivel de agua en el que se querían preservar las muestras, debido principalmente a los errores generados en las cajas de preservación de las muestras, por lo que se humedecieron constantemente las muestras para garantizar el correcto proceso de curado.

Aspectos positivos:

Después de realizar un análisis independiente de las variables que afectaban la calidad de la muestra a partir del modelo experimental desarrollado en el semillero, se logró determinar la necesidad de generar alternativas de preservación de las muestras de concreto, que permitieran un resultado más uniforme, lo cual a partir de los resultados obtenidos demostró un gran avance en este aspecto.

Además, se percibió una mejora en la calidad y fluidez de la mezcla otorgada principalmente por los materiales utilizados, el cuidado en las proporciones utilizadas y la inclusión del trompo en la preparación de la mezcla.

Para el procesamiento de las imágenes la ayuda del software ArcGIS fue de gran importancia, específicamente, la herramienta *ProjectBuilder* permitió la creación de modelos para realizar el proceso de forma automática, por lo que es un avance en cuanto a la escalabilidad que representa en términos de técnica y de modelos generados para una futura interpretación de la evolución de la resistencia del concreto en obra.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

REFERENCIAS

- Arita, J., Sasaki, K., Takahiro, E., & Yasuoka, Y. (2001). Assessment of Concrete Degradation with Hyper-spectral Remote Sensing. *22nd Asian Conference on Remote Sensing*, (November), 5–9
- Alava ingenieros. (2011). Artículo Técnico, 2–4. Retrieved from <http://www.grupoalava.com/repositorio/5347/pdf/7468/2/articulo-tecnicomulti-e-hiper.pdf>
- ASTM C597-16. (2016). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0597-16>
- ASTM C873 / C873M-15. (2015). Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0873_C0873M-15.
- Badilla, V. (2014). Correlación de diferentes métodos de detección no destructivos de anomalías en el hormigón. Universidad politécnica de catalunya
- Brook, A., & Ben-dor, E. (2011). Reflectance spectroscopy as a tool to assess the quality of concrete in situ. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 2(8)(August), 169–188. <http://doi.org/10.5897/JCECT11.078>
- Céspedes García , M. A. (2003). RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO A PARTIR DE LA VELOCIDAD DE PULSOS DE ULTRASONIDO. *PIRHUA*, 1-112. Obtenido de https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1338/ICI_100.pdf
- Comercial de Ingeniería DAGA. (2012). Obtenido de dagasl: <https://www.dagasl.es/hormesc1.htm>
- El Tiempo. (2 de Junio de 2016). Sector de la construcción ha tenido un ritmo menor en primer trimestre. *El Tiempo*. Recuperado el 2 de Febrero de 2017, de <http://www.eltiempo.com/economia/sectores/cifras-sobre-el-sector-de-la-construccion-en-colombia-en-2016/16610389>
- Giraldo, M. A., & Tobón, J. I. (2006). Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. *Dyna*, 69-81.
- Gustavo, R. (s.f.). Correlación entre variables. *Apuntes de clase del curso Seminario Investigativo VI*, 0-1. Recuperado el 17 de 04 de 2017, de http://viref.udea.edu.co/contenido/menu_alterno/apuntes/ac36-correlacion-variables.pdf

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2000). *Citas y notas de pie de página NTC 147*. Bogotá: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2000). *Documentación. Referencias bibliográficas para libros, folletos e informes. NTC 1160 segunda actualización*. Bogotá: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2000). *Documentación. Referencias bibliográficas para publicaciones seriadas. NTC 1308 segunda actualización*. Bogotá: ICOTEC.
- Instituto Nacional de Vias. (2012). *NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INVIAS*. Bogotá: INVIAS.
- Instron. (2013). *instron*. Obtenido de Ensayo de compresión de cilindros de hormigón: <http://www.instron.com.ar/es-ar/testing-solutions/by-material/concrete/compression/concrete-cylinders>
- lafrancesco, G. (2003). *La investigación es educación y pedagogía*. Bogotá: Magisterio.
- Maruthi, F., Chapin, T., Vincent, R., Axe, M., & Frizado, J. (2007). Identifying the effects of different construction practices on the spectral characteristics of concrete. *Cement and Concrete Research*, 38(4). Retrieved from <http://www.sciencedirect.com.recursosbiblioteca.eia.edu.co/science/article/pii/S0008884607002888>
- Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. (2011). *MUESTREO DE POBLACIONES: TAMAÑO DE LA MUESTRA*. Recuperado el 1 de 05 de 2017, de http://recursostic.educacion.es/descartes/web/materiales_didacticos/muestreo_poblaciones_ccg/tamano_muestra.htm
- NEODEX-Concrete Non Destructive Testing. (13 de Mayo de 2017). *YOUTUBE*. Obtenido de YOUTUBE: <https://www.youtube.com/watch?v=1K9NTxwQ43E>
- NRMCA. (2018). Obtenido de <https://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP34es.pdf>
- Orozco , E. (5 de 5 de 2015). *BLOG 360° EN CONCRETO*. Recuperado el 17 de 4 de 2017, de <http://blog.360gradosenconcreto.com/variables-que-afectan-la-resistencia-del-concreto-como-controlarlas/>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Ortiz Cangrejo, Á. E. (2015). *Análisis y descripción de la producción de concretos en obra de cinco proyectos de vivienda en Colombia*. Universidad militar nueva grande. Retrieved from [http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/6340/1/Tesis Ortiz.pdf](http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/6340/1/Tesis%20Ortiz.pdf)

Palma, H. J. H. (2011). *Procesamiento digital de imágenes* (Vol. 2007). Chile. Retrieved from [http://www.gep.uchile.cl/Publicaciones/Tratamiento Digital de Imágenes - Jaime Hernández 2011.pdf](http://www.gep.uchile.cl/Publicaciones/Tratamiento%20Digital%20de%20Imágenes%20-%20Jaime%20Hernández%202011.pdf)

Patologias Construccion. (2013). *Patologias Construccion*. Obtenido de Resistencia del hormigón mediante esclerómetro (2) Ensayo y valor Fc: <https://www.patologiasconstruccion.net/2013/11/resistencia-del-hormigon-mediante-esclerometro-2-ensayo-y-valor-fc/>

Penalzoa, D. (16 de Junio de 2014). *Youtube*. Obtenido de Extracción de núcleos de concreto.: <https://www.youtube.com/watch?v=7pc9kNV-TjM>

Rashmi, R. A., Ashwini, D. M., & Sunil, T. (2013). Concrete Structure Analysis and Classification using Image Processing. *International Journal of Advanced Computer Researc*, 284-287.

Revuelta Crespo, D., & Gutiérrez Jiménez, J. (2008). *ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN MEDIANTE EL MUESTREO, EXTRACCIÓN Y ROTURA DE PROBETAS TESTIGO*. Madrid: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Recuperado el 19 de Febrero de 2017

Rimoldi, C., & Mundo, L. M. (2012). ENSAYO NO DESTRUCTIVO POR MÉTODO DE ULTRASONIDO. 1 - 41 .

Rodriguez, O., & Arredondo, H. (2005). *Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor MODIS de la Nasa, aplicado en estuod en Ingeniería Civil*. Pontificia universidad javeriana. Retrieved from <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis123.pdf>

Shaban, A. (2013). *Determination of Concrete Properties Using Hyperspectral Imaging Technology*. Melbourne: Science Journal Publicacion. doi:10.7237/sjcea/102

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Silva, O. J. (28 de Febrero de 2017). *360gradosenconcreto*. Obtenido de <http://blog.360gradosenconcreto.com/ensayo-pulso-ultrasonico-concreto-algunas-ventajas/>
- Tamayo, M. T. (1999). *Serie: Aprender a investigar módulo 5: el proyecto de investigación*. Bogotá: ICFES.
- Universidad De los Andes. (2014). *CONCEPTO TÉCNICO EN RELACIÓN A LAS CAUSAS MÁS PROBABLES DEL COLAPSO DEL EDIFICIO SPACE*. Bogota. Recuperado el 19 de Febrero de 2017
- Universidad iberoamericana. (s.f.). *Biblioteca Francisco Javier Clavijero*. Recuperado el 4 de Febrero de 2008, de ¿Cómo cito la información que encontré en internet?: http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/biblioteca/articulos/pdf/refer_internet.pdf
- Valerazo, M. (15 de Julio de 2011). *SLIDESHARE*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/mfvalarezo/ensayos-8606120>
- Villegas Negrete, L. (2012). *VIGA DE CONCRETO MICRO-REFORZADO PARA LOSAS PREFABRICADAS EN EDIFICACIONES DE USO RESIDENCIAL*. Envigado: Universidad EIA. Recuperado el 17 de 4 de 2017
- www.fisterra.com. (2001). *Relación entre variables cuantitativas*. Recuperado el 01 de 05 de 2017
- Zhejiang Tugong. (2003). *Zhejiang Tugong*. Obtenido de china-geotest: <http://www.china-geotest.org/concrete/concrete-penetrometer/digital-concrete-penetrometer.html>