



# ESTIMACIÓN DE DAÑOS OCASIONADOS POR LA CARBONATACIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO EN LA CIUDAD DE NIRGUA

## ESTIMATION OF DAMAGE CAUSED BY CARBONATION IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN NIRGUA CITY

Diego, Peña<sup>1</sup>; Jhonny, Rodríguez<sup>2</sup>; Dinora, Salcedo<sup>3</sup>; Mariana, Suarez Pereira<sup>4</sup>

Recibido 20/04/2022: Aprobado: 01/06/2022

DOI: <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica232.7>

### RESUMEN

La presente investigación consistió en el levantamiento de daños en estructuras de concreto armado en la ciudad de Nirgua, Estado Yaracuy, Venezuela. Mediante inspección preliminar en la que se recolectaron datos de interés estadístico, se identificaron, clasificaron y cuantificaron las fallas o daños presentes tales como: grietas, fisuras, desprendimiento del concreto, delaminación del acero, sangramiento, manchas, coqueas, entre otras. El levantamiento se realizó en dos zonas de la ciudad, zona A denominada Sector Aire Libre, y zona B denominado Sector la Flor del Encanto E.B “Miguel Ángel Granado”. La selección del número de estructuras a inspeccionar se determinó mediante muestro probabilístico, considerando investigaciones preliminares, en las que se determinó una constante de carbonatación aproximadamente de 8,32mm/años<sup>0.5</sup>. Este estudio permitió determinar si la carbonatación ha causado daños en las estructuras a través de la corrosión.

**Palabras clave:** carbonatación; corrosión del acero; delaminación del acero

<sup>1</sup>Diego, Peña. Ingeniero civil. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Venezuela. Correo: [diegoucladic16@gmail.com](mailto:diegoucladic16@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5994-8785>

<sup>2</sup>Jhonny, Rodríguez. Ingeniero civil. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Venezuela. Correo: [kloyter87@gmail.com](mailto:kloyter87@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8787-9406>

<sup>3</sup>Dinora, Salcedo. Docente del Decanato de Ingeniería Civil de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Departamento de Construcción. Venezuela. Correo: [dinorasp@yahoo.es](mailto:dinorasp@yahoo.es) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4538-2463>

<sup>4</sup>Mariana, Suarez Pereira. Ingeniero Civil. Docente investigadora de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Departamento de Ciencias Básicas. Venezuela. Correo: [marianasuarez@ucla.edu.ve](mailto:marianasuarez@ucla.edu.ve) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4187-8066>

## ABSTRACT

The present investigation consisted of surveying damage to reinforced concrete structures in the city of Nirgua, Yaracuy State, Venezuela. Through a preliminary inspection in which data of statistical interest was collected, failures or present damages were identified, classified and quantified, such as: cracks, fissures, concrete detachment, steel delamination, bleeding, stains, cracks. The survey was carried out in 2 zones, zone A called Sector Aire Libre, and zone B called Sector la Flor del Encanto E.B "Miguel Ángel Granado". The selection of the number of structures to inspect was determined by probabilistic sampling, considering preliminary investigations, in which a carbonation constant of approximately 8.32 mm/year 0.5 was determined. This study made it possible to determine if carbonation has caused damage to structures through corrosion.

**Keywords:** carbonation; steel corrosion; steel delamination

## 1. INTRODUCCIÓN

En el mundo existen infinidad de estructuras construidas de concreto armado, las cuales están expuestas a sufrir una serie de fallas o daños bien sea por ataques del ambiente o por el uso de ella. El principal daño que ocurre en el concreto reforzado es ocasionado por la corrosión, generando inconvenientes de durabilidad de la estructura traducidos en altos costos de reparación y problema de seguridad de esta. En Venezuela con el tiempo han incrementado las patologías en edificaciones debido a las acciones del ambiente, falta de mantenimiento, mal empleo de los materiales o falta de conocimiento generales en la inspección de las obras civiles generando daños graves en las estructuras.

La carbonatación es la disminución del pH del concreto por la acción del dióxido de carbono atmosférico (CO<sub>2</sub>) en presencia de agua. Los gases contenidos en la atmósfera o humo, las aguas puras, turbias, ácidas, selenitosas y marinas; compuestos fluidos o sólidos de naturaleza orgánica, combustibles, líquidos alimentarios Constituyen una de las causas principales de corrosión química del hormigón. Los gases mencionados son el resultado de la combustión del carbón, así como de los derivados del petróleo utilizados con fines de tracción.

Específicamente la ciudad de Nirgua, estado Yaracuy no se exceptúa de los agentes agresivos presentes en ambientes urbanos e industriales que deterioran nuestras estructuras de concreto armado. El municipio Nirgua se ubica al sureste del estado, se encuentra en la trayectoria de una de las principales autopistas del país que une el occidente con el centro de Venezuela, como lo es la Troncal 11, muy transitada por vehículos pesados, originando una de las principales fuente de emanación del CO<sub>2</sub>. En el trabajo de Rojas y Zavala [1] determinaron para la zona un valor de la constante de carbonatación  $K = 8,32\text{mm/años}^{0.5}$ , siendo este un valor alto, ya que según el Manual DURAR [2], una constante de carbonatación  $K > 4\text{mm/años}^{0.5}$ , clasifica el ambiente como agresivo. Por consiguiente, si este compuesto es el

principal factor de corrosión por carbonatación, que a su vez desencadena fallas o daños en las estructuras de concreto armado como: grietas, fisuras, desprendimiento, delaminación del acero y sangramiento; es necesario realizar un levantamiento de daños que permita formular un diagnóstico de las patologías presentes a través de una inspección preliminar y detallada de forma visual; con el objetivo de identificarlas, clasificarlas y cuantificarlas.

La importancia de los levantamientos de daños es investigar las principales patologías que ocurren en el concreto reforzado para establecer el estado general en el que se encuentra una edificación en el transcurso del tiempo, generándose inconvenientes de durabilidad, problemas de seguridad y altos costos de reparación a nivel mundial. Y así, determinar si es necesario pasar a una inspección más rigurosa y realización de ensayos de acuerdo a la magnitud del daño.

La presente investigación consta de la inspección visual y recolección de daños por carbonatación en las estructuras de concreto armado con edades mayores a 20 años, en dos zonas urbanas del municipio Nirgua, estado Yaracuy, Venezuela; descripción de cada uno con su respectiva reseña fotográfica, y cuantificación de estos mediante análisis estadístico descriptivo. La evaluación de dichos daños contribuye al aporte de datos relevantes a los investigadores del área y a los entes constructores públicos y privados que, mediante el conocimiento del problema pueden hacer uso de nuevas técnicas constructivas y de mantenimiento, con el fin de construir estructuras que cumplan con la durabilidad y vida útil

## **2. DESARROLLO**

### **2.1. Levantamiento de Daños**

Es el procedimiento mediante el cual se caracterizan las principales fallas de corrosión en las estructuras de concreto armado, como efectos de los agentes agresivos del medio de exposición al que se encuentran expuestos, a través de una inspección visual, que en una primera fase puede ser preliminar y posteriormente una fase más detallada. En la inspección preliminar se recopila información acerca de todo lo referente a la edificación, fecha de la inspección, croquis del área de estudio, seguido de un registro fotográfico de la fachada principal y las sintomatologías de fallas observadas en la estructura, la extensión y gravedad de esta.

En la inspección detallada se presenta una información más precisa de cada uno de los elementos estructurales que conforman la edificación para constatar la existencia de falla por corrosión, como son: fisuras, grietas, sangrado del concreto, abombamiento del concreto, falta

de recubrimiento, pérdida de este y disminución de la sección del acero de refuerzo. De estas fallas encontradas se especifican su ubicación dentro del elemento, extensión y espesores, todo ello acompañado de una representación gráfica del elemento afectado, identificando claramente la descripción y ubicación de la falla, su respectivo reporte fotográfico y el croquis de ubicación de las fallas en los elementos estructurales que conforman la edificación.

Ebensperger y Donoso [3] realizaron un estudio para presentar una metodología de diagnóstico de estructuras complementaria a la inspección visual en dos puentes ubicados en Chile en condiciones climáticas diferentes, que permitió mediante la ejecución in-situ de ensayos no-destructivos (END), entregar una evaluación cuantitativa integral del *Estado de Salud* de los distintos elementos, ajustar los ciclos de mantención o tomar decisiones a tiempo de situaciones críticas y asegurar el desempeño futuro. Para lo cual, se consideró la extracción de testigos de menor tamaño 1" a fin de determinar el avance de la carbonatación o cloruros, la ejecución de END para determinar el estado de las armaduras de refuerzo, las características del hormigón de recubrimiento, y la presencia de grieta. Concluyeron que la metodología propuesta busca instalarse entre los niveles conocidos como *Diagnóstico Visual* y el *Diagnóstico Detallado*.

Otro estudio llevado a cabo por Lima *et al.* [4] referido a manifestaciones patológicas en estructuras de hormigón en viaductos urbanos ubicadas en el Eje Rodoviario Norte de Brasilia, por medio de la metodología GDE / UnB, que califica y cuantifica la degradación de daños estructurales. Para ello realizó inspecciones en campo, catalogó las manifestaciones patológicas estructurales con levantamiento fotográfico, caracterización de las manifestaciones patológicas y clasificación según los factores de ponderación y factores de intensidad de daños de la estructura conforme a dicha metodología. Concluyó que en el viaducto 01, 02 y 03 el elemento que presentó mayor grado de deterioro fue la Losa con un valor de 34,67; 62,46 considerado alto y 84,53 considerado alto respectivamente.

En otro aporte, se analizó y estimó la vida útil de estructuras de hormigón armado bajo la acción de corrosión uniforme. El modelado se dividió en dos etapas, iniciación y propagación. La primera fue realizada por medio de Redes Neuronales Artificiales (RNA) y el modelado de la fase de propagación fue hecho por medio del Método de los Elementos Finitos (MEF). El acoplamiento de la RNA en el MEF demostró la eficiencia del uso de herramientas numéricas en el desarrollo de modelos para el estudio y la simulación de mecanismos complejos de la degradación de estructuras de concreto armado, corroborando con los estudios de patología de las construcciones [4].

## **2.2. Carbonatación**

Según Salcedo [5], la carbonatación del concreto es la disminución de su pH alcalino, por debajo de un valor crítico ubicado alrededor de 9,5, pasando de 12,5–13,0 a 9,0-8,0 por la reacción entre el CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O de la atmósfera y los álcalis contenidos en la solución de los poros del concreto, causando la despasivación del acero y como consecuencia de ello su corrosión generalizada, si hay suficiente humedad ambiental. Uno de los procesos de degradación del concreto armado en ambientes urbanos e industriales es causado por el CO<sub>2</sub> del aire y dado que el concreto es un material poroso, por medio del cual este penetra desde el exterior hacia su interior produciéndose un tipo de reacción química, denominada la carbonatación.

El proceso de carbonatación es completamente natural y se ve afectado por otros factores que se encuentran en el concreto y en el ambiente; el contenido de humedad del ambiente cuando este se encuentra entre 60 y 75 por ciento, la carbonatación avanza más violentamente. El recubrimiento del concreto y defectos de superficie involucra la calidad del concreto, en cuanto a defectos de superficie como grietas, pequeños hoyos, que darían un acceso directo al acero de refuerzo y en cuyas áreas por la pérdida de pasivación, este comenzaría a corroerse en un lapso de pocos años. Así mismo en los bordes, el recubrimiento de concreto adecuado es pertinente, ya que en ellos el dióxido de carbono se difunde hacia el acero de refuerzo en dos direcciones y la carbonatación conduciría a la corrosión causando astillamiento rápidamente.

## **2.3. Corrosión del Concreto Armado**

La corrosión del acero de refuerzo es un proceso electroquímico de deterioro que afecta la durabilidad de las estructuras de concreto armado, se inicia por efecto de la carbonatación o por la presencia de cloruros en el concreto, de allí que necesita de las condiciones microambientales cercanas a la fase del metal. El óxido producto de la corrosión origina que aparezcan manchas que son zonas de color y aspecto diferente del resto de la generalidad del concreto, específicamente en los bordes de las fisuras que se originan, ya que este óxido es expansivo y crea fuertes movimientos en el concreto que hacen que se rompa por tracción, presentando fisuras estas a la vez siguen las líneas del acero principal e incluso de los estribos si la corrosión ha sido muy fuerte, de ahí la aparición de manchas sobre la masa del concreto [6].

El óxido expansivo mencionado, además de las fuertes tensiones en el concreto ocasiona aumento de volumen de aproximadamente diez veces su volumen original, dando lugar en las

estructuras a que se produzcan desprendimientos localizados importantes en la capa de recubrimiento, esto es desuniones del concreto respecto a donde se encontraba fijo o unido. Es muy frecuente que aparezcan en elementos estructurales cóncavos, en ángulo en los que el acero de tracción no ha seguido una línea quebrada, ni está perfectamente unida; en los nudos con estribos, con respecto a la armadura de la zona de compresión [6].

El incremento del volumen en el interior del concreto como se ha mencionado previamente producto del proceso de oxidación y que se convierte en fuertes tensiones de hasta 400 Kg/cm<sup>2</sup> en el concreto, origina también disgregaciones y fuerzas de separación con la matriz del concreto que inciden directamente en la adherencia del acero con dicho material. Esto se debe ya a una corrosión generalizada que involucra a todo el metal afectándolo de manera homogénea y en toda su superficie [6].

La formación del óxido expansivo se acelera cuando las estructuras están expuestas a ambientes salinos y en presencia de humedad, en estos casos la destrucción del concreto armado se incrementa enormemente, originado pérdida o disminución de la sección útil producto de la corrosión química y electroquímica del acero. En este orden de ideas la corrosión es relevante para el acero, no solamente disminuirán su sección útil, sino que, además tiene dos inconvenientes importantes: producir disgregaciones en el concreto y debilitar la sección resistente de las barras de acero, juntos constituyen situación que compromete seriamente el comportamiento estructural de la estructura.

La observación y análisis permiten determinar las causas de las manifestaciones de daños o fallas que se encuentran de manera evidente, y más cuando se trata de una combinación de circunstancias. Es importante señalar cuales son algunas de las fallas o daños que afectan y desencadenan la corrosión ocasionada por la carbonatación en las estructuras de concreto armado, como lo son: grietas, fisuras, desprendimiento, delaminación del acero y sangramiento, manchas; manifestaciones estudiadas en el contexto de esta investigación [6].

- Grietas, son aberturas largas y estrechas producto de la separación del concreto en dos partes, con la consecuente afectación desfavorable en los elementos estructurales y cuya causa son los efectos de las condiciones climáticas. Si la grieta es suficientemente ancha que permite la entrada del electrolito o suficientemente estrecha para impedir que la solución salga con facilidad, origina las condiciones verificables para que se produzca el ataque corrosivo
- Coqueras en contacto con las armaduras: la discontinuidad producida por coqueras

interiores hace que existan zonas en la armadura sometidas a elevada humedad en el interior del concreto, pero sin estar en contacto con alcalinidad alguna. Esta zona se corroerá de la misma forma que si estuvieran sometidas a una atmósfera de elevada humedad [2].

- Fisuras transversales: pueden constituir en principio un camino rápido de llegada de los agentes agresivos hasta la misma dependiendo de su abertura. Las fisuras en la misma dirección de la armadura son, en general debidas a un proceso de corrosión ya iniciado, fisuras pudieran aparecer en procesos constructivos incorrectos como retracción del fraguado, estribos de bajo rendimiento, estados de tensión o de compresión. Estos factores pueden inducir una despasivación del acero que se encuentra embebido en el concreto, y si el pH se encuentra en valores ácidos ( $\text{pH} < 8$ ) se produce una neutralización del medio alcalino propio del concreto, originándose de esta forma el fenómeno de corrosión [2].
3. Sangramiento: es el lavado del óxido de hierro proveniente de la corrosión del acero de refuerzo, el estado superficial de éste afectará las reacciones que tendrían lugar en contacto con él, por ser la superficie del acero la primera interface con el medio. Por esta razón los productos de corrosión presentes de forma masiva, no adherentes a él deben ser eliminados, porque originan problemas de adherencia o condiciones propicias para la corrosión de la armadura en el concreto [2].
  4. Delaminación del acero: es el daño que consiste en la pérdida o separación de las capas que lo componen producto de la corrosión química y electroquímica del acero, originando disminución de la sección útil y debilitamiento significativo de la resistencia mecánica del material [2].

## 5. METODOLOGÍA

Es una investigación de campo de tipo descriptiva, la muestra objeto de estudio se conformó por 2 zonas: la A denominada sector Aire Libre en la calle 2, cancha deportiva aire libre; y zona B denominada sector La Flor del Encanto en la calle 6, E.B. Miguel Ángel Granados, ambos en la ciudad de Nirgua, estado Yaracuy en Venezuela, donde se determinó estadísticamente el tamaño muestral representativo para realizar los levantamientos de daños. La zona A conformada por 280 estructuras y la B por 438 estructuras, observados en las Figuras 1 y 2, de acuerdo a datos suministrados por el Instituto Nacional de Estadística del Estado Yaracuy [7]. Ambas se delimitaron bajo el conocimiento meteorológico en el que se establece que los elementos climáticos se mantienen en un radio de acción de un kilómetro, y

en base a ese parámetro se decidió delimitar un perímetro de radio de 500m, partiendo desde el punto referencial de la zona A y B. Estos puntos son las estaciones de exposición donde se determinó la constante de carbonatación de cada zona, que tiene un valor aproximado de  $8,32\text{mm/años}^{0.5}$  [1].

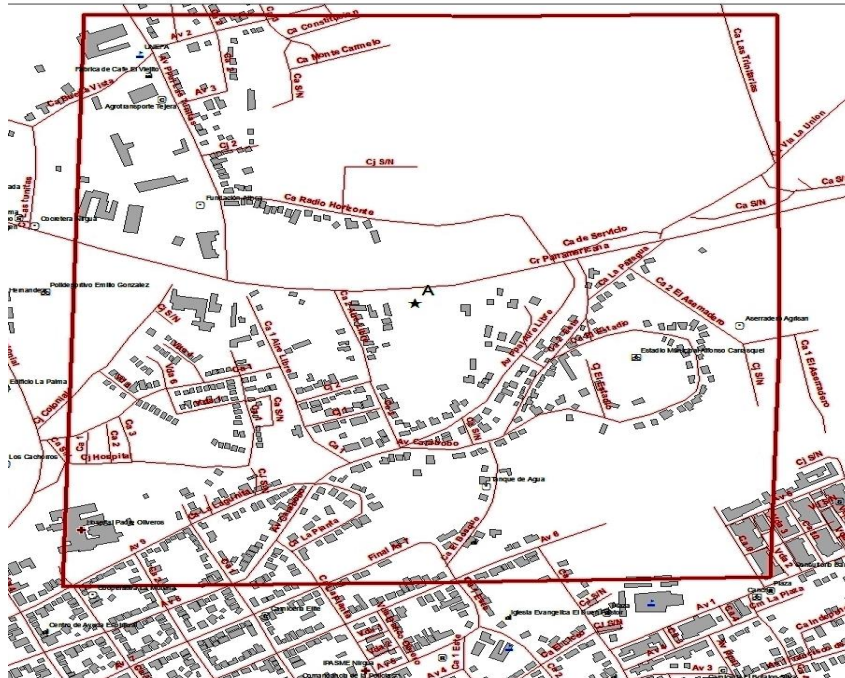


Figura 1. Croquis referencial zona A (Sector Aire Libre-calle 2). Fuente: [7].

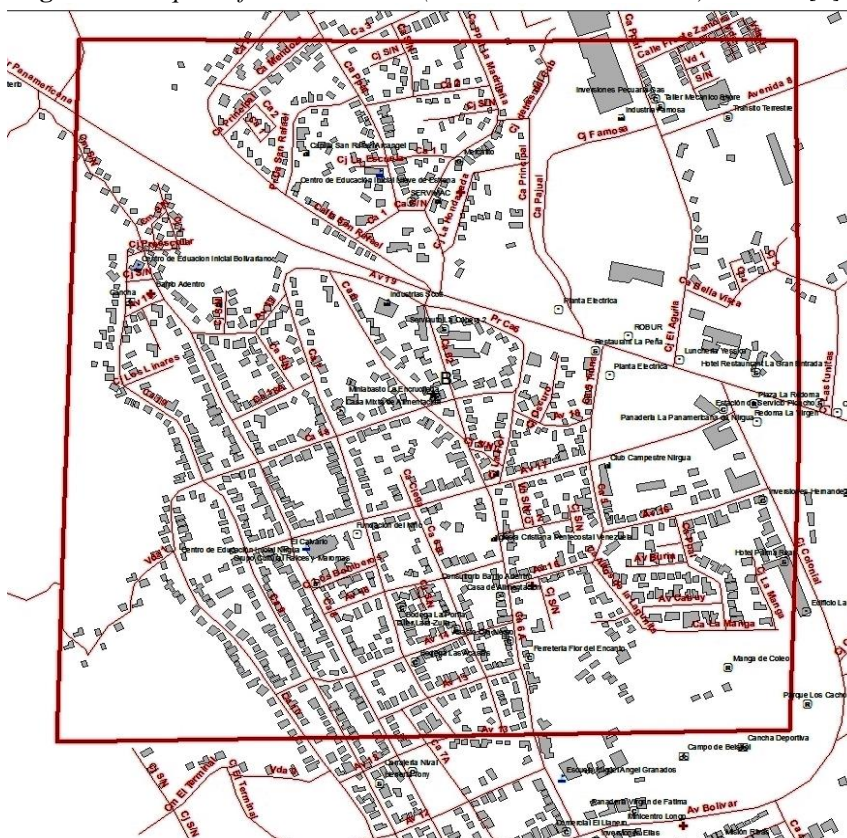


Figura 2. Croquis referencial zona B Sector La Flor del Encanto – Escuela Básica Miguel Ángel Granado. Fuente: [7].



Para determinar el tamaño de la muestra (n) se utilizó un muestreo probabilístico, calculándose una muestra representativa de 72 estructuras de concreto armado para la zona A y 79 para la B, seleccionadas por el método de muestro aleatorio simple por conglomerado en cada una de ellas, cuyos elementos que la conforman tienen la misma probabilidad de ser elegidos. Se define el muestreo aleatorio simple por conglomerado, por ser el tipo de muestra que se utilizó en este trabajo de investigación que consiste simplemente en dividir la población en unidades físicas o áreas y de cada unidad se seleccionan las estructuras a estudiar al azar simple empleando la ecuación (1):

$$n = \frac{Z^2 * N * p * q}{E^2 (N-1) + Z^2 * p * q} \quad (1)$$

Dónde:

n = Tamaño de la muestra

Z = Nivel de significancia

N = Tamaño de la población

p = Probabilidad de éxito

q = Probabilidad de fracaso

E = Error de estimación

Los datos para el manejo de la ecuación se evidencian en la Tabla 1:

**Tabla 1.** Número de estructuras estudiadas por zona. Fuente: los autores

Zona de estudio	Z	N	E	q	P	n
A	1,95996	280	0,10	0,5	0,5	72
B	1,95996	438	0,10	0,5	0,5	79

### 3.1. Inspección de la Estructura y Levantamiento de Datos

Para la inspección de las estructuras se elaboró una planilla denominada “Descripción de la Estructura” para recolectar la mayor información necesaria, donde se realizó una inspección visual detallada para cada elemento (Ver Figura 3). Registrando los daños observados y signos aparentes de corrosión que afectan la estructura. Una vez observada alguna falla o daño en la inspección ocular se procedió con otra inspección detallada, a través de una planilla denominada “Levantamiento de Daños” (Ver Figura 4). Los daños o fallas en relevancia a observar eran: grietas, fisuras, desprendimientos, delaminación de acero, sangramiento, manchas, coqueras, otras.

 <p style="text-align: center;">UNIVERSIDAD CENTROCCIDENTAL LISANDRO ALVARADO DECANATO DE INGENIERIA CIVIL BARQUISIMETO- EDO. LARA</p> 					
<b>DESCRIPCION DE LA ESTRUCTURA</b>					
<b>NOMBRE DE LA ESTRUCTURA:</b>				<b>ZONA:</b>	
<b>DIRECCION:</b>			<b>FECHA DE INSPECCION:</b>		
<b>SISTEMA CONSTRUCTIVO:</b>			<b>EDAD:</b>		
CROQUIS			ELEMENTO ESTRUCTURAL INSPECCIONADO		
FALLAS O DAÑOS		SI	NO	CANTIDAD (%)	
				VIGA	COLUMNA
				MACHON	
GRIETAS					
FISURAS					
DESPRENDIMIENTOS					
DELAMINACION DEL ACERO					
SANGRAMIENTO					
MANCHAS					
COQUERAS					
OTROS					

Figura 3. Planilla “Descripción de la Estructura”. Fuente: los autores



 <p style="text-align: center;">UNIVERSIDAD CENTROCCIDENTAL LISANDRO ALVARADO DECANATO DE INGENIERIA CIVIL BARQUISIMETO- EDO. LARA</p> 	
<b>LEVANTAMIENTO DE DAÑOS</b>	
<b>NOMBRE DE LA ESTRUCTURA:</b>	
<b>ELEMENTO ESTRUCTURAL INSPECCIONADO:</b>	
<b>UBICACION DEL ELEMENTO ESTRUCTURAL CON DAÑOS:</b>	
DESCRIPCION DEL DANO	
REPORTE FOTOGRAFICO DEL DANO	

Figura 4. Planilla “Levantamiento de Daños”. Fuente: los autores

En las estructuras inspeccionadas se tomó en cuenta la división de la luz de las vigas, columnas y machones para ubicar las fallas o daños, dicha división se hizo en tres zonas iguales representada en las Figuras 5 y 6.

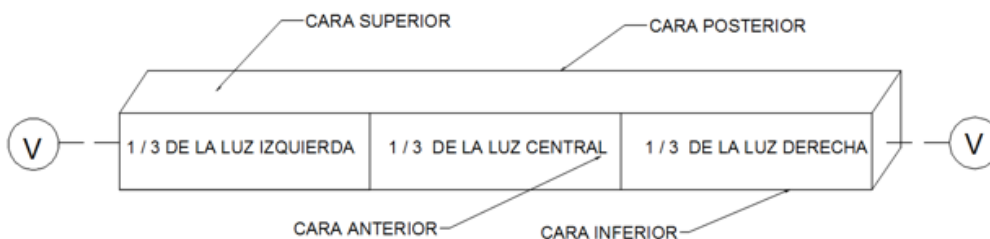


Figura 5. Ubicación de vigas. Fuente: los autores

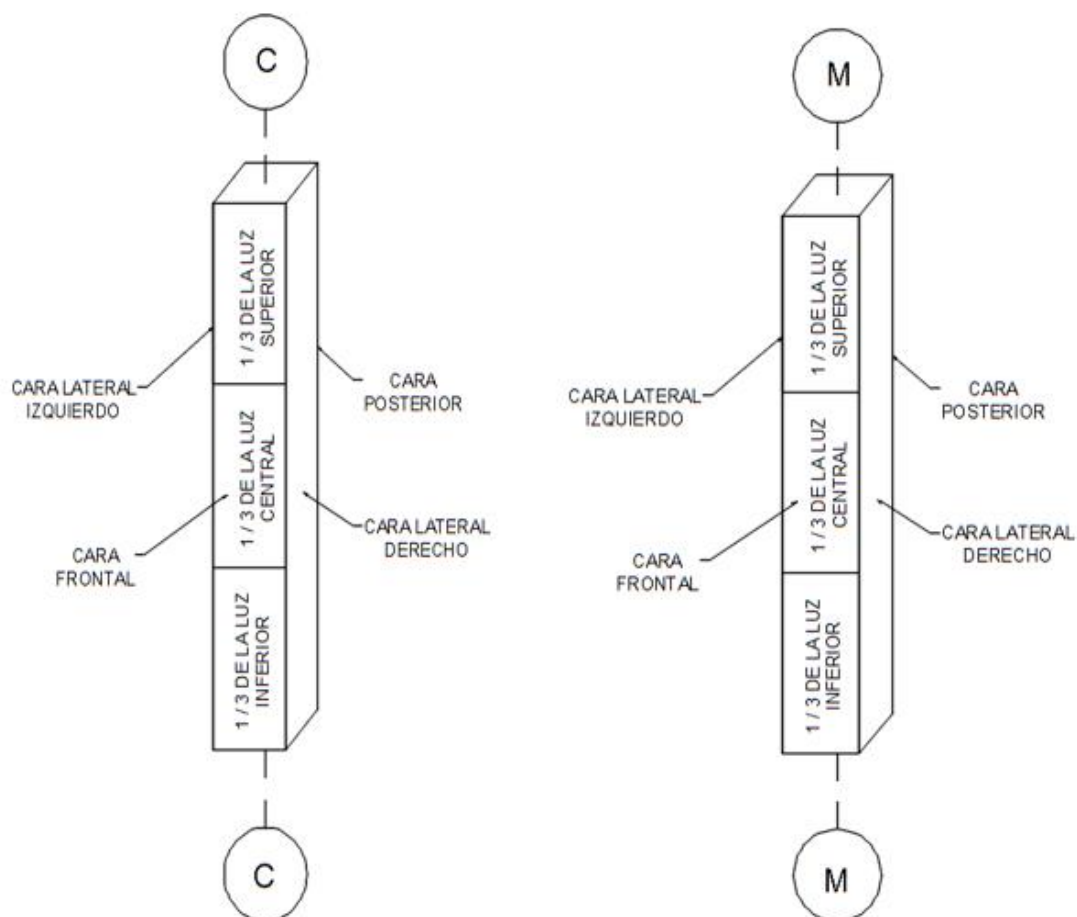


Figura 6. Ubicación de columnas (C) y machones (M). Fuente: los autores

### 3.2. Técnica de Análisis

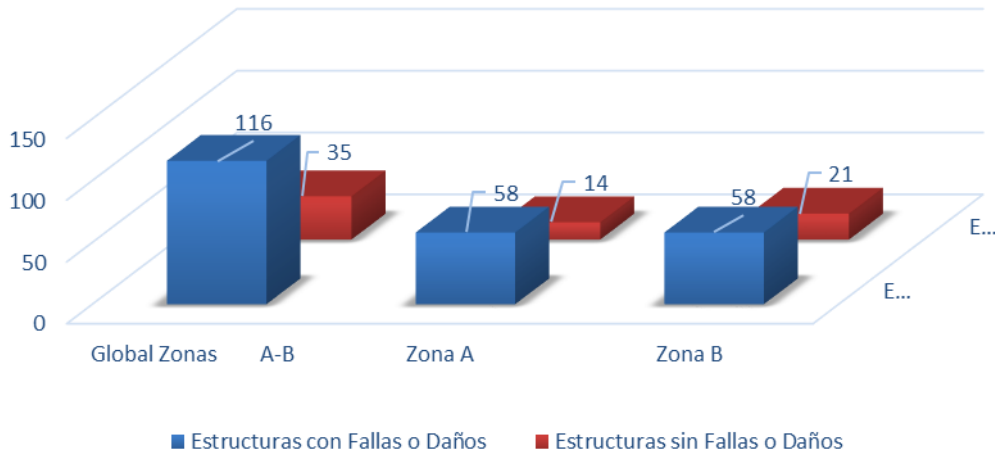
Una vez realizado el levantamiento de daños en cada una de las estructuras de concreto armado, se procedió a ingresar toda la información de forma digital y contabilizar la cantidad de daños en cada una de las zonas estudiadas. Se realizó un análisis estadístico descriptivo general determinándose el número de estructuras que presentaron fallas, y en base a ese número de estructuras se clasificaron las fallas de acuerdo a la tipología de las mismas para posteriormente relacionarlas con la edad de las edificaciones, ubicación de la falla y concentración del CO<sub>2</sub>.

## 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En primer lugar se procedió a evaluar de forma general la presencia de fallas o daños en las zonas A y B (ver Tabla 2 y Figura 7)

**Tabla 2.** Incidencia de fallas o daños en las zonas de estudio. Fuente: los autores

Zona de estudio	Número de estructuras inspeccionadas	Número de estructuras con daños	Número de estructuras sin daños
A	72	58	14
B	79	58	21
Total	151	116	35



**Figura 7.** Incidencia de fallas o daños en las zonas de estudio. Fuente: los autores

Los resultados muestran que el número de estructuras dañadas es mayor a no dañadas, se puede observar que el 76,8% de las estructuras inspeccionadas presentaron fallas o daños en su sistema constructivo, mientras que el 23,2% no presentaron ningún tipo de fallas o daños de la totalidad para ambas zonas; probablemente debido a:

- Falta de control de calidad en el diseño de la mezcla del concreto y colocación del material
- Nivel freático alto
- Constante de Carbonatación de  $K= 8,32 \text{ mm/años}^{0.5}$  [1]
- Falta de mantenimiento

Específicamente, el 80,6% de las estructuras inspeccionadas presentaron fallas o daños en su sistema constructivo, mientras que el 19,4% de las estructuras inspeccionadas no presentaron ningún tipo de fallas o daños para la zona A. Mientras que, en la B, se observó que el 73,4% de las estructuras inspeccionadas presentaron fallas o daños en su sistema constructivo, mientras que el 26,6% de las estructuras inspeccionadas no presentaron alguna falla o daño de la totalidad de muestras para la zona B. Al compararse las estructuras dañadas entre las zonas, hay un porcentaje mayor en la A, existe alta probabilidad que la causa sea que está ubicada en las adyacencias de la Troncal Once del país, donde transitan un elevado número de vehículos que conlleva a aumentar el contenido de CO<sub>2</sub> en el lugar.

#### 4.1. Estructuras Dañadas por Corrosión

En la zona A, existe un total de 35 estructuras que al momento de ser inspeccionadas presentaron fallas o daños ocasionados por corrosión, mientras que en la B, existe un total de 20 estructuras. Como se dijo anteriormente esto puede deberse a que en las adyacencias de la zona A, pasa una de las troncales más importante que une el occidente con el centro del país lo que conlleva a que haya una gran confluencia de vehículos que emiten CO<sub>2</sub>, elevando los niveles de dióxido de carbono presentes en el ambiente, afectando las estructuras aledañas (ver Tabla 3).

**Tabla 3.** Incidencia de fallas o daños por corrosión en las zonas de estudio. Fuente: los autores

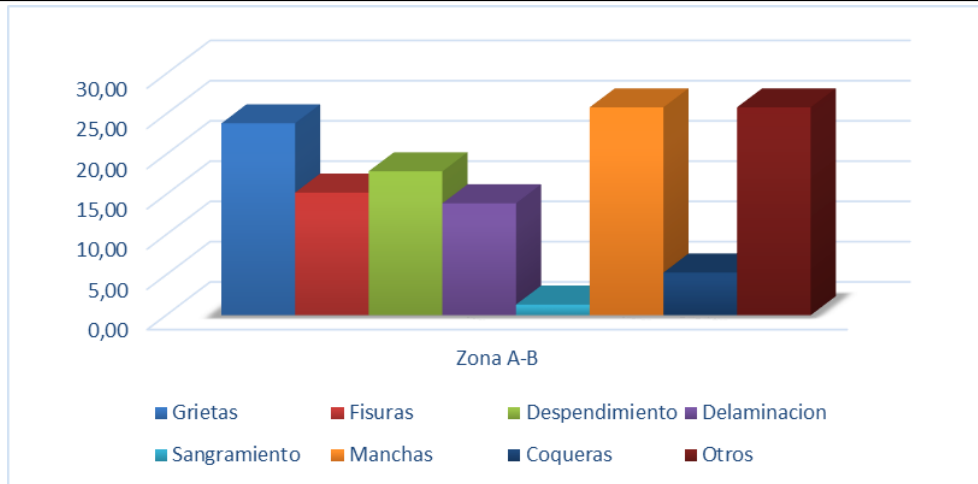
Zona de estudio	Número de estructuras con daños	Número de estructuras con daños por corrosión	Porcentaje de daños por corrosión (%)
A	58	35	64,34
B	58	20	34,48

Por otro lado, el 60,34% de las estructuras inspeccionadas en la zona A presentaron fallas o daños por corrosión en su sistema constructivo, mientras que el 39,66% de las estructuras inspeccionadas presentaron algún otro tipo de daños. Se puede observar que el 34,48% de las estructuras inspeccionadas en la B presentaron fallas o daños por corrosión en su sistema constructivo, mientras que el 65,52% de las estructuras inspeccionadas presentaron algún otro tipo de daños.

**Tabla 4.** Fallas o daños de forma global en las zonas de estudio. Fuente: los autores

Fallas o daños	Número de estructuras afectadas	Porcentaje (%)
Grietas	36	23,84
Fisuras	23	15,23
Desprendimiento	27	17,88
Delaminación del acero	21	13,91
Sangramiento	2	1,32
Manchas	39	25,83
Coqueras	8	5,30
Otros	39	25,83

Debido a que la zona A se encuentra en un ambiente favorable para la carbonatación, comprobado por una constante  $K = 8,32 \text{ mm/años}^{0,5}$ , [1]. Esta K al superar un valor de  $4 \text{ mm/años}^{0,5}$  [2] clasifica el ambiente agresivo.



**Figura 8.** Incidencia de fallas o daños en las zonas de estudio. Fuente: los autores

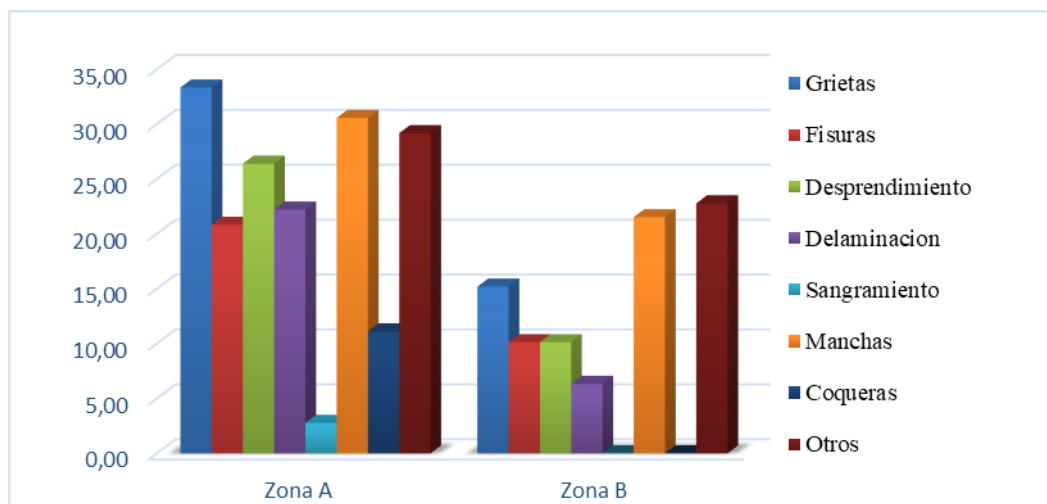
Se pueden observar en la Tabla 4 y la Figura 8 todas las fallas o daños existentes en las estructuras inspeccionadas, donde la predominante fue la que presentaba manchas por humedad representando un 25,83% y otros daños presentes con un 25,83%. La mayoría de estos daños se ubicaron a 1/3 de la luz inferior de las columnas y manchones y en la parte inferior de las fachadas. Se identificaron manchas y otros daños en los elementos estructurales de concreto armado en contacto con el suelo y la intemperie. Estos causados principalmente además de la humedad del entorno, por la infiltración de agua por lluvia del suelo adyacente a la estructura y por la infiltración de agua del pavimento cercano a la edificación, así como la mala calidad del concreto traducido en gran cantidad de poros que permiten la ascensión capilar del agua a través de la matriz del concreto.

**Tabla 5.** Fallas o daños por zonas de estudio. Fuente: los autores

Fallas o daños	Zona A	Porcentaje (%)	Zona B	Porcentaje (%)
Grietas	24	33,33	12	15,19
Fisuras	15	20,83	8	10,13
Desprendimiento	19	26,39	8	10,13
Delaminación del acero	16	22,22	5	6,33
Sangramiento	2	2,78	0	0
Manchas	22	30,56	17	21,52
Coqueras	8	11,11	0	0
Otros	21	29,17	18	22,78

Esto establece cualitativamente la incidencia y gravedad de dichos daños, pues para poder asegurar cuál es la causa del problema sólo se puede demostrar haciendo un ensayo, en este caso una calicata para hacer un estudio de suelo que indique el nivel freático; también se pueden hacer inspecciones al sistema de aguas blancas, aguas negras, drenajes, además evaluar las losas adyacentes a la edificación como las aceras y chequear las pendientes. Ensayos y evaluaciones que no son objeto de estudio, que consiste en una inspección visual y

diagnóstico preliminar. La presencia de fallas o daños por cualquier otra circunstancia también se observa con mayor frecuencia, cuya causa es el mal vaciado-encofrado y colocación de separadores de acero en la etapa constructiva, como el desprendimiento del friso, abombamiento en pintura. De acuerdo a Tabla 5 y correspondiente Figura 9 se puede notar que la falla o daño con más frecuencia en la zona A, son las grietas arrojando un 33,33%, mientras que un 22,78% de otros daños predomino en la zona B.

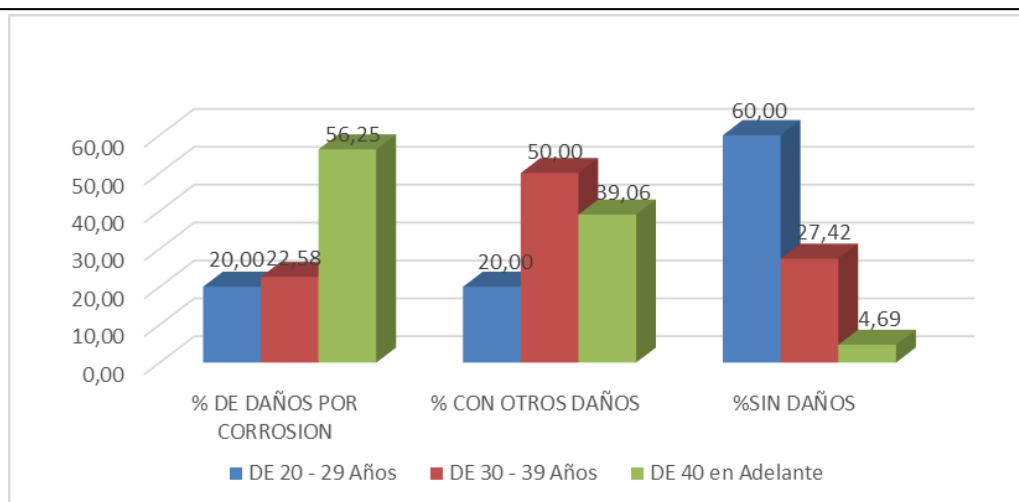


**Figura 9.** Porcentaje de daños existentes por zonas de estudio. Fuente: los autores

La mayoría de estas grietas se ubicaron en el primer tercio de la luz de las columnas y manchones. Como se puede observar, todas las fallas o daños existentes en la zona A, son mayores a las de la zona B, prueba evidente de que en las adyacencias de la troncal once predomina la alta agresividad del medio, referido a permitir el progreso de la corrosión por carbonatación. De acuerdo con la Tabla 6 y correspondiente Figura 10 se puede observar la incidencia de las edades de las estructuras inspeccionadas en porcentaje de las fallas o daños que resultaron del levantamiento de daños, las estructuras más jóvenes presentaron un 20,00% de daños por corrosión, 20,00% con otros daños y un 60,00% sin daños. Para las estructuras comprendidas entre 30-39 años el 22,58% fue con presencia de daños por corrosión, 50,00% con otros daños y 27,42 no obtuvieron daños.

**Tabla 6.** Estructuras inspeccionadas por edades por zonas de estudio. Fuente: los autores

Edades (años)	Número de estructuras inspeccionadas	Número por daños de corrosión	Número por otros daños	Número de estructuras sin daños
20-29	25	5	5	15
30-39	62	14	31	17
40 o más	64	36	25	3



**Figura 10.** Porcentaje de Estructuras Inspeccionadas por edades por zona de estudio. Fuente: los autores

Las estructuras más viejas representaron el 56,25% de daños por corrosión, 39,06% con otros daños y el 4,69% estructuras sin fallas o daños. Para los daños por corrosión se puede notar que las estructuras más viejas son las que se encuentran mayormente afectadas. Los otros daños sobre las estructuras pudieran influir progresivamente al proceso corrosivo por carbonatación, creando rutas de acceso al acero de refuerzo y su respectiva pérdida de pasivación. Otra de las fallas o daños más frecuentes tanto en la zona A como para la zona B, son producto del mal vaciado, una mala granulometría entre otros, y estas afectarían directamente a las estructuras expuestas en un ambiente agresivo. También se pudo observar que la tendencia de fallas o daños respecto a los años de servicios que tienen todas las estructuras estudiadas es el comportamiento esperado, ya que mientras más años tenga una estructura habrá más probabilidad que estén afectadas por Carbonatación siendo este un proceso continuo que aumenta con el tiempo.

Por último, relacionando las principales fallas encontradas con las variables ambientales de la zona, que según el estudio anterior y que sirvió de insumo a esta investigación se tienen concentración del CO<sub>2</sub> en el ambiente entre 200 y 450 ppm, temperaturas entre 20 y 37 °C y Humedad relativa entre 36,73 y 38,15 %. La literatura señala que concentración del CO<sub>2</sub> entre 400 ppm y 800 ppm se considera un ambiente agresivo desde el punto de vista de la Carbonatación; contenidos de humedad entre 60% y 75% la reacción que da lugar a la carbonatación avanza violentamente; temperaturas altas proporciona la movilidad de las moléculas facilitando el transporte de sustancias, como lo es el CO<sub>2</sub> y bajas temperaturas puede dar lugar a condensaciones, que a su vez origina aumentos locales de vapor de agua en la atmósfera y que varía con la temperatura.

En este sentido los valores de las variables ambientales en la zona indican que estamos en



presencia de un ambiente favorable para que se dé la carbonatación, con el consiguiente inicio de la despasivación del acero respecto a la humedad relativa y temperatura que presenta el concreto, variables que pudieron influir en la penetración del Dióxido de Carbono cuya concentración fue baja. Se puede decir entonces que existe un deterioro progresivo en la zona A, como lo muestra el hecho que 35 (60,34%) de las edificaciones presentan sintomatología de corrosión por carbonatación, de una muestra de 58 edificaciones inspeccionadas con daños, debido a estas condiciones ambientales que favorece el desarrollo de los procesos de carbonatación. En consecuencia, la aparición de estas fallas se ve beneficiada por la falta de control en las prácticas constructiva y la mala calidad del concreto reportado por el 39,66% de otros daños. Mientras que en la zona B existe un deterioro más lento pero progresivo, como lo muestra el hecho que 20 (24,48%) de las edificaciones presentan sintomatología de corrosión por carbonatación, de una muestra de 58 edificaciones inspeccionadas con daños, debido a estas condiciones ambientales puesto que daños de otra índole fueron mayores

## 5. CONCLUSIONES

La información recopilada de los levantamientos de daños en este estudio determinó que de 151 estructuras inspeccionadas, 116 presentan fallas o daños. De la muestra en la zona A con daños, más del 50% de las edificaciones inspeccionadas manifiestan síntomas de fallas por corrosión, específicamente por carbonatación mientras que de la muestra en la zona B con daños menos de 50%. La mayoría se ubicó a un tercio de la luz inferior de las columnas y manchones y en la parte inferior de las fachadas.

Los elementos estructurales que sufrieron la mayor incidencia de daños fueron las vigas, columnas y manchones que pueden ser comprobados visualmente por los registros fotográficos de las planillas de inspección. Las causas principales de los daños observados en las estructuras son: son las precipitaciones, la humedad, la falta de control de calidad, compactación inapropiada por vibración, mala granulometría de los agregados y separadores constructivos de acero, nivel freático del suelo y una constante de carbonatación  $K = 8,32\text{mm/años}^{0.5}$ .

El principal daño de corrosión por carbonatación, fue la grieta, en la zona A pero no en la zona B. La mayoría de estas grietas se ubicaron a un tercio de la luz inferior de las columnas y manchones. Las fallas por cualquier otra circunstancia también se observan con mayor frecuencia en ambas zonas. La zona A es la que presenta la mayoría de los daños por corrosión por carbonatación con respecto a la zona B, por su cercanía a la Troncal Once del país y la diferencia entre ellas es el flujo de vehículos que es más intenso.

En base a las inspecciones detalladas y del análisis descriptivo de los resultados se puede comprobar que la Carbonatación si desencadena la corrosión en la zona A de la ciudad de Nirgua, ya que, en dicha zona, la mayoría de los daños son causados por este fenómeno. A pesar de que la constante de carbonatación K es mayor a 8mm/años<sup>0.5</sup>, que representa un valor alto y agresivo para las estructuras de concreto armado, la mayoría no son afectadas por este fenómeno, debido a que daños por otra índole predominó con mayor frecuencia de forma global en las zonas de estudio.

Se comprobó que a medida que aumentan las edades de las estructuras se desarrolla el deterioro de las mismas, debido al mayor tiempo de exposición ambiental. Las acciones a tomar en los ambientes estudiados, para evitar la penetración de las sustancias dañinas, consiste en usar tecnología que aseguren un concreto con baja porosidad para aumentar su impermeabilidad y disminuir el transporte a través de él. Los procedimientos gerenciales en la construcción de obras civiles deben ir acompañados del respectivo diseño por durabilidad.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Decanato de Ingeniería Civil por el apoyo

## 7. FINANCIAMIENTO

Los autores no contaron con financiamiento de entes públicos ni privados, sólo recursos propios

## 8. CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

## 9. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Visita de campo y levantamiento de información D.P., J. R. y D. S.; marco teórico y metodología, D.P., J. R., D. S. y M. S. P.; redacción D.P., J. R.; edición, D. S. y M. S. P. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

## 10. REFERENCIAS

- [1] M. Rojas y F. Zavala, "Estimación de la constante de carbonatación "k" en concreto expuesto al ambiente en la ciudad de Nirgua Estado Yaracuy", Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Venezuela, 2016
- [2] O. Troconis, A. Romero, C. Andrade, P. Helene y I. Díaz "Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado", Red Iberoamérica XV.B, DURAR, España, Disponible en: <https://docplayer.es/21242219->

Durar-manual-de-inspeccion-evaluacion-y-diagnostico-de-corrosion-en-estructuras-de-hormigon-armado.html

- [3] L. Ebensperger, J.P. Donoso, "Nueva metodología de diagnóstico de estructuras de hormigón armado con técnicas no-destructivas", Construtechnik Ltda., BDL Soluciones Estructurales SpA - Santiago, Chile, 2020
- [4] H. J. N. Lima, R. S. Ribeiro, R. A. Palhares y G. S. S. A., Melo, "Análisis de manifestaciones patológicas del concreto en viaductos urbanos", *Revista ALCONPAT*, 9 (2), pp.247 – 259, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.308>, 2019
- [5] D. Salcedo, "Durabilidad del concreto armado", Trabajo realizado para optar por el grado de Magister, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Venezuela, 2007
- [6] M. Vásquez y W. GALICIA, "Vida útil en estructuras de concreto armado desde el punto de vista de comportamiento del material", Disponible en: <http://blog.pucp.edu.pe/blog/wp-content/uploads/sites/109/2010/12/Corrosion-UPAO.pdf>, Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú, 2010
- [7] Instituto Nacional de Estadística del Estado Yaracuy, INE, San Felipe, Venezuela, 2016