



**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**

**MODELO DE PREDICCIÓN DE  
CORROSIVIDAD EN ESTRUCTURAS  
UBICADAS EN LA COSTA DE LOS  
ESTADOS CARABOBO Y FALCÓN  
IMPLEMENTANDO LA  
HERRAMIENTA DE REDES  
NEURONALES ARTIFICIALES**

**Autor:**  
Bryan D'Santiago  
C.I: 26.878.059

Urb. Yuma II, Calle N. ° 3, Municipio San Diego  
Teléfono: (0241) 8714240 (Master) - Fax: (0241) 871239



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**MODELO DE PREDICCIÓN DE CORROSIVIDAD EN ESTRUCTURAS  
UBICADAS EN LA COSTA DE LOS ESTADOS CARABOBO Y FALCÓN  
IMPLEMENTANDO LA HERRAMIENTA DE REDES NEURONALES  
ARTIFICIALES**

Proyecto del Trabajo de Grado para optar al título de  
**INGENIERO MECÁNICO**

**Autor:** D'Santiago L. Bryan M.

**C.I.** V – 26.878.059

**Tutor:** Ing. Donato Romanello

San Diego, Agosto 2019



FI-N-001-2019-2CE

Valencia, 02 de Julio de 2019

Ciudadanos:  
Bryan D'Santiago  
C.I:26.878.059  
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 01-2019 de fecha 02-07-2019 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **MODELO DE PREDICCIÓN DE CORROSIVIDAD EN ESTRUCTURAS UBICADAS EN LA COSTA DE LOS ESTADOS CARABOBO Y FALCÓN IMPLEMENTANDO LA HERRAMIENTA DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES** presentado por usted (es) como requisitos para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Donato Romanello, C.I: 4.131.877 y la Ing. Alicia De Pizzella C.I:4.598.880 como Tutores Académico y Metodológico que los asesoraran en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

Prof. Luis Lira

Decano de la Facultad de Ingeniería



c.c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1)

L/le.



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

#### ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Donato Romanello, portador de la cédula de identidad N° V-4.131.877, en mi carácter de tutor del Trabajo de Grado presentado por el ciudadano Bryan Manuel D'Santiago Linares, portador de la Cédula de Identidad N° V-26.878.059, titulado **MODELO DE PREDICCIÓN DE CORROSIVIDAD EN ESTRUCTURAS UBICADAS EN LA COSTA DE LOS ESTADOS CARABOBO Y FALCÓN IMPLEMENTANDO LA HERRAMIENTA DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES**. Presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, mes de agosto del año dos mil diecinueve.



Ing. Donato Romanello

C.I.: V-4.131.877



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

San Diego, agosto 2019

**ACTA DE REVISIÓN DEL PROYECTO TRABAJO DE GRADO**

Quienes suscriben esta Acta, dejan constancia que el proyecto trabajo de grado: **MODELO DE PREDICCIÓN DE CORROSIVIDAD EN ESTRUCTURAS UBICADAS EN LA COSTA DE LOS ESTADOS CARABOBO Y FALCÓN IMPLEMENTANDO LA HERRAMIENTA DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES** ha sido revisado y, cumpliendo con los requisitos exigidos para su aprobación, recomiendan su tramitación ante el organismo académico correspondiente.

Ing. Donato Romanello

Tutor Académico

\_\_\_\_\_

Firma

\_\_\_\_\_

Fecha

Ing. Alicia de Pizzella

Tutor Metodológico

\_\_\_\_\_

Firma

\_\_\_\_\_

Fecha

## ÍNDICE

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pp.</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xiii</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>

### **CAPÍTULO**

#### **I EL PROBLEMA**

1.1 Planteamiento del problema .....	2
1.2 Formulación del problema .....	6
1.3Objetivos de la investigación .....	6
1.3.1 Objetivo General: .....	6
1.3.2 Objetivos Específicos: .....	6
1.4 Justificación.....	6
1.5 Limitaciones .....	7
1.6 Alcance.....	7

#### **II MARCO TEÓRICO**

2.1 Antecedentes de la investigación .....	4
2.2 Bases Teóricas.....	10
2.2.1 Redes Neuronales Artificiales .....	10
2.2.2 Definición de una red neuronal artificial.....	11
2.2.3 Características de las Redes Neuronales Artificiales .....	13
2.2.4 Elementos básicos que componen una red neuronal .....	15
2.2.4.1 Neurona Artificial .....	15
2.2.4.2Función transferencia.....	17
2.2.5 Mecanismos de aprendizaje.....	20
2.2.5.1 Aprendizaje supervisado .....	22

2.2.5.2 Aprendizaje no supervisado .....	25
2.2.6 Topología de una red neuronal artificial.....	26
2.2.7 Perceptrón simple .....	30
2.2.8 Introducción al concreto armado .....	31
2.2.8.1 Concreto .....	31
2.2.8.2 Componentes del concreto .....	31
2.2.8.3 Diseño de mezclas de concreto .....	33
2.2.8.4 Fraguado del concreto.....	33
2.2.8.5 Endurecimiento del concreto .....	34
2.2.8.6 Curado del concreto .....	34
2.2.8.7 Permeabilidad del concreto.....	34
2.2.8.8 Acero de refuerzo.....	35
2.2.9 Fundamentos generales de la corrosión.....	37
2.2.9.1 Corrosión.....	37
2.2.9.2 Ambientes corrosivos.....	37
2.2.9.3 Corrosión atmosférica .....	38
2.2.10 Corrosión en el concreto armado.....	40
2.2.10.1 Corrosión en armadura de concreto .....	40
2.2.10.2 Corrosión del concreto armado como fenómeno electroquímico.....	40
2.2.10.3 Agentes químicos que inducen el deterioro en el concreto..	41
2.2.10.4 Causas de corrosión en las armaduras.....	42
2.2.11 Clasificación de la corrosión .....	42
2.2.12 Factores que Afectan y Desencadenan la Corrosión de las Armaduras .....	48
2.3 Definición de términos básicos .....	55

### **III MARCO METODOLÓGICO**

3.1 Tipo de investigación .....	57
3.2 Nivel de la investigación .....	57
3.3 Diseño de la investigación.....	57

3.4 Población y Muestra.....	58
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	58
3.6 Fases de la investigación.....	59

#### **IV ANÁLISIS DE RESULTADOS**

4.1 Establecer una relación entre la agresividad del medio ambiente y las estructuras civiles. ....	61
4.2 Diseñar las arquitecturas neuronales empleadas para la modelización de las variables de control. ....	64
4.3 Generar correlaciones con redes neuronales artificiales para predecir la corrosividad. ....	67
4.3.1 Recopilación de datos.....	67
4.3.2 Preparación de los datos: .....	69
4.3.3 Aplicación de los modelos matemáticos: .....	70
4.3.4 Normalización de los datos.....	75
4.3.5 Datos Entrenados.....	79
4.4 Establecer una comparación entre las correlaciones matemáticas ya existentes y el valor predicho por medio de la herramienta computacional. ....	83

<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>93</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>95</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>96</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>	<b>Pp.</b>
1. Neurona Biológica .....	12
2. Comparación entre neurona artificial y neurona biológica. ....	13
3. Ejemplo de una red neuronal totalmente conectada.....	15
4. Proceso de una red neuronal. ....	17
5. Funciones transferencia. a) Hardlim, b) Hardlims .....	18
6. Función transferencia a) lineal, b) mixta .....	18
7. Función transferencia a) Sigmoidal, b) Tangente Hiperbólica .....	19
8. Clasificación de las redes neuronales artificiales.....	20
9. Influencia de la salida de la neurona $N_j$ en la entrada de la neurona $N_i$ . ....	23
10. Dinámica básica de retro propagación de errores .....	24
11. Estructura de un sistema basado en redes neuronales.....	27
12. Red con propagación hacia adelante o <i>feedforward</i> .....	28
13. Red con propagación hacia atrás o <i>feedback</i> .....	29
14. Red recurrente.....	29
15. Red de Hopfield .....	30
16. Perceptrón simple.....	31
17. Elementos constituyentes de la celda de corrosión.....	40
18. Mecanismo de corrosión uniforme del concreto armado.....	47
19. Corrosión Galvánica .....	47
20. Influencia del contenido de humedad del hormigón sobre algunos procesos de deterioro. ....	62
21. Influencia de la humedad relativa efectiva sobre el riesgo de corrosión de las armaduras .....	63
22. Influencia de la temperatura sobre el riesgo de corrosión de las armaduras.....	64
23. Esquema del mecanismo de transporte dentro de la red .....	65
24. Sistema de ingreso de datos de la red en Joone. ....	65
25. Esquema de la red neuronal estilo Perceptrón. ....	67
26. Grafica de correlaciones reales y entrenadas para el modelo MICAT en Coro.....	84
27. Grafica de correlaciones reales y entrenadas para el modelo MICAT + ISO CORRAG en Coro.....	84
28. Grafica de correlaciones reales y entrenadas para el modelo ISO CORRAG en Coro .....	85
29. Grafica de correlaciones reales y entrenadas para el modelo MICAT en Puerto Cabello. ....	86
30. Grafica de correlaciones reales y entrenadas para el modelo MICAT + ISO CORRAG en Puerto Cabello.....	86
31. Grafica de correlaciones reales y entrenadas para el modelo ISO CORRAG en Puerto Cabello .....	87

32. Grafica de correlaciones reales y entrenadas para el modelo MICAT en Punto Fijo	88
33. Grafica de correlaciones reales y entrenadas para el modelo MICAT + ISO CORRAG en Punto Fijo.....	88
34. Grafica de correlaciones reales y entrenadas para el modelo ISO CORRAG en Punto Fijo.....	89
35. Categorización de la contaminación por dióxido de azufre (ISO 9223:1992).....	89
36. Categorización de la contaminación por aerosoles salinos (ISO 9223:1992).....	90
37. Clasificación de tiempo de humectación.....	90
38. Estimación de la corrosividad atmosférica según la ISO 9223:1992.....	91
39. Perdidas por corrosión atmosférica.....	92

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA</b>	<b>Pp.</b>
1. Datos recopilados para la ciudad de Coro.....	68
2. Datos recopilados para la ciudad de Puerto Cabello.....	69
3. Datos recopilados para la ciudad de Punto Fijo.....	69
4. Modelo MICAT aplicado en Coro.....	71
5. Modelo MICAT + ISO CORRAG aplicado en Coro.....	71
6. Modelo ISO CORRAG aplicado en Coro.....	72
7. Modelo MICAT aplicado en Puerto Cabello.....	72
8. Modelo MICAT + ISO CORRAG aplicado en Puerto Cabello.....	73
9. Modelo ISO CORRAG aplicado en Puerto Cabello.....	73
10. Modelo MICAT aplicado en Punto Fijo.....	74
11. Modelo MICAT + ISO CORRAG aplicado en Punto Fijo.....	74
12. Modelo ISO CORRAG aplicado en Punto Fijo.....	75
13. Normalización del modelo MICAT en Coro.....	76
14. Normalización del modelo MICAT + ISO CORRAG en Coro.....	76
15. Normalización del modelo ISO CORRAG en Coro.....	77
16. Normalización del modelo MICAT en Puerto Cabello.....	77
17. Normalización del modelo MICAT + ISO CORRAG en Puerto Cabello.....	78
18. Normalización del modelo ISO CORRAG en Puerto Cabello.....	78
19. Normalización del modelo MICAT en Punto Fijo.....	78
20. Normalización del modelo MICAT + ISO CORRAG en Punto Fijo.....	79
21. Normalización del modelo ISO CORRAG en Punto Fijo.....	79
22. Datos Entrenados modelo MICAT en Coro.....	80
23. Datos Entrenados modelo MICAT + ISO CORRAG en Coro.....	80
24. Datos Entrenados modelo ISO CORRAG en Coro.....	81
25. Datos Entrenados modelo MICAT en Puerto Cabello.....	81
26. Datos Entrenados modelo MICAT + ISO CORRAG en Puerto Cabello.....	82
27. Datos Entrenados modelo ISO CORRAG en Puerto Cabello.....	82
28. Datos Entrenados modelo MICAT en Punto Fijo.....	82
29. Datos Entrenados modelo MICAT + ISO CORRAG en Punto Fijo.....	83
30. Datos Entrenados modelo ISO CORRAG en Punto Fijo.....	83
31. Velocidades de deposición promedio de los agentes aeroquímicos, TDH y Corrosión.....	90



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA**  
**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE MECÁNICA**

**MODELO DE PREDICCIÓN DE CORROSIVIDAD EN ESTRUCTURAS  
UBICADAS EN LA COSTA DE LOS ESTADOS CARABOBO Y FALCÓN  
IMPLEMENTANDO LA HERRAMIENTA DE REDES NEURONALES  
ARTIFICIALES**

**Autor:** Bryan D'Santiago

**Tutor:** Ing. Donato Romanello

**Fecha:** Agosto 2019

**RESUMEN**

El presente trabajo de investigación consiste en el estudio del fenómeno de la corrosión y la clasificación de la atmosfera presente a lo largo de las costas de los estados Carabobo y Falcón, con la finalidad de realizar un modelo predictivo en Joone, mediante el uso de redes neuronales artificiales de dicho fenómeno en las estructuras civiles. Mediante la obtención de data encontrada en bases de datos climatológicos, constará a la formación de la red neuronal, entrenamiento y se comprobación de su funcionamiento. Basado en los datos arrojados por las correlaciones creadas, utilizando el uso de 3 modelos matemáticos y el de la RNA, usando valores promedios de los contaminantes aeroquímicos, o agentes externos, mediante el implemento o el uso de las normas ISO 9223:1997, se categorizó la costa de los estados Carabobo y Falcón como una zona de alto nivel de corrosión ambiental.

**Descriptor:** Corrosión, Atmósfera, Modelos, Redes Neuronales Artificiales.

## INTRODUCCIÓN

De alguna manera u otra, todos estamos familiarizados con la corrosión. En nuestro alrededor podemos observar y presenciar que cotidianamente sufrimos de sus efectos. Se entiende como corrosión el proceso espontaneo y continuo que afecta a un material, hecho por el hombre, como una serie de alteraciones físico químicas por la acción de agentes naturales.

Las virtudes de las estructuras de concreto armado y su armadura, determinaron a principios del siglo XX, un incremento notable en su uso. Generando una permanente transformación en cuanto a la tecnología, atesorando un aporte considerable de ingenio. Se creyó que estas tendrían una vida útil infinita, sin embargo la actualidad es otra. Se ve un elevado número de estructuras prematuramente deterioradas por efecto de la corrosión, situación la cual ha impulsado un gran interés a la investigación orientada a la identificación de técnicas y productos para neutralizar esta condición natural, dependiendo a la zona geográfica donde se ubique.

El deterioro de las estructuras ha sido un tema de gran preeminencia para las industrias de construcción en los últimos años. A nivel mundial viene a ser uno de los fenómenos más trascendentales en la economía, por lo que resulta ser un problema capital. Según la Sociedad General de la Organización de Estados Unidos (OEA, 1979), los daños causados por la corrosión equivalen al 3.5% del producto nacional bruto en países industrializados y en vías de desarrollo. Por lo general, los ataques electroquímicos que causan la corrosión atmosférica, son causados por factores climatológicos tales como la humedad relativa, temperatura, la presión del oxígeno, la radiación solar, el viento y la contaminación del medio ambiente. Investigaciones previamente llevadas a cabo, pretendieron llegar a la realización de un mapa, o modelo, de la corrosividad atmosférica. Dichos modelos habitualmente son obtenidos mediante regresiones lineales, por lo que existe un enfoque para generar

correlaciones y extraer información a partir de datos complejos e inciertos, conocido como Redes Neuronales Artificiales (RNA).

Dada la relevancia del tema, se planteó la realización de una investigación que tiene como propósito generar un modelo de predicción de corrosividad en estructuras ubicadas en la costa de los estados Carabobo y Falcón implementando el uso de la herramienta Redes Neuronales Artificiales.

Asimismo, el presente estudio, se estructuró para su presentación en cuatro (4) capítulos: El capítulo I, comprende el planteamiento de problema, el objetivo general, los objetivos específicos, justificación y alcance de esta investigación. El capítulo II, abarca marco teórico conformado por antecedentes de la investigación, bases teóricas y sistema de variables del estudio. El capítulo III comprende del marco metodológico donde se muestra detalladamente las actividades efectuadas en esta investigación para alcanzar los objetivos propuestos. El capítulo IV se nombran los recursos humanos utilizados, así como los recursos institucionales, recursos materiales necesarios para el desarrollo y financieros.

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1 Planteamiento del problema

Desde el inicio del siglo XX, el concreto ha sido el material primordial para la construcción de estructuras civiles, tanto en Venezuela como a nivel mundial. Su eficiencia consta de la estructura al acero de refuerzo con el que es combinado dando lugar al concreto armado. Una de las propiedades más esenciales de este material es su gran durabilidad, proporcionada por el progresivo aumento en su resistencia con el tiempo y capacidad de soportar las cargas a las que sea sometida. El empleo de dichos materiales en estructuras se convirtió en costumbre, superando a los demás materiales por un gran margen. Dichas estructuras son diseñadas para tener una larga vida útil, sin embargo, para garantizar esto no solo se debe tomar en cuenta los esfuerzos de sometimiento, sino también el ambiente y sus agentes agresivos capaces de un potencial daño a las mismas, deteriorándolas hasta el punto de ineficacia. Se consideran agentes agresivos al aire, la humedad, atmósferas tropicales, rurales, urbanas e industriales; ácidos minerales y orgánicos, entre otros.

Se conoce como corrosión al deterioro de los materiales debido a la interacción con agentes externos expuesto en el medio ambiente y no siempre implica el cambio de peso o deterioro visible, ya que esta se puede manifestar por variaciones en las propiedades de dicha, disminuyendo así su resistencia. Por lo tanto, la corrosión de la armadura es la causa más común responsable del deterioro y degradación de las estructuras de concreto.

El fenómeno de la corrosión en su fase inicial genera pequeñas grietas, o fisuras, ubicadas coincidentemente con las barras de refuerzo. Estas grietas, causadas por las tensiones internas producidas por el óxido expansivo formado alrededor de las barras, van incrementando con el tiempo. La velocidad con la cual avanza la corrosión e incrementa su agrietamiento, depende de la exposición a agentes externos tales como: el oxígeno, la presencia de humedad, el grado de carbonatación y el contenido de iones cloro. Al llegar a niveles más avanzados de

la corrosión, se produce el desprendimiento de concreto o de su recubrimiento, disminuyendo el de concreto útil. En consecuencia, la corrosión también produce pérdidas de sección en las armaduras causando la deducción de su capacidad resistente, por efecto a la desaparición de la adherencia al concreto. Como consecuente, aumenta las solicitaciones sobre la sección de concreto la cual a su vez se ha visto reducida en su capacidad resistente por los efectos de la corrosión.

Por eso en Venezuela, el fenómeno de la corrosión ha traído un alto índice de pérdidas en las estructuras de concreto, consecuencia de falta de iniciativa por parte de los ingenieros al momento de tomar medidas adicionales para obtener una mayor vida útil, o durabilidad, al construir en ambientes agresivos y a su vez los pocos recursos técnicos e investigativos que se cuenta para estudiar dicho fenómeno. Además, es importante señalar que la región costera de Venezuela es uno de los ambientes más agresivos del mundo. El mismo desarrollo de dicha región y la velocidad con la que se construye las obras civiles en la misma, conllevan a la necesidad de estudiar más a profundo este fenómeno de manera de prevenir su ocurrencia y buscar soluciones a los daños ocasionados, aumentando así su durabilidad.

Cuando se trabaja con técnicas estadísticas convencionales tales como regresiones lineales, es muy difícil satisfacer el número elevado de suposiciones rígidas que son vitales para la justificación de su aplicación, como el tamaño de muestra, continuidad y linealidad. Una alternativa usada en las últimas décadas, basada en la teoría de inteligencia artificial, son las Redes Neuronales Artificiales (RNA), han recibido un interés exclusivo como una tecnología o modelo capaz de realizar cálculos caracterizados por algoritmos estadísticos convencionales en el reconocimiento de patrones, problemas de clasificación y ajuste de funciones.

En este orden de ideas, son capaces de modelar efectivamente y eficientemente problemas grandes y complejos mediante las relaciones halladas de forma inductiva por medio de los algoritmos de aprendizaje basado en los datos ya existentes.

De la realidad planteada, el presente trabajo especial de grado plantea la necesidad de generar correlaciones mediante el uso de redes neuronales

artificiales para la predicción de corrosividad en las estructuras ubicadas en la costa de los estados Carabobo y Falcón.

## **1.2 Formulación del problema**

¿Cómo predecir la corrosividad en las estructuras ubicadas en las costas de los estados Carabobo y Falcón?

## **1.3 Objetivos de la investigación**

### **1.3.1 Objetivo General:**

Generar correlaciones mediante el uso de redes neuronales artificiales para la predicción de corrosividad en las estructuras ubicadas en la costa de los estados Carabobo y Falcón.

### **1.3.2 Objetivos Específicos:**

1. Establecer una relación entre la agresividad del medio ambiente y las estructuras civiles.
2. Diseñar las arquitecturas neuronales empleadas para la modelización de las variables de control.
3. Generar correlaciones con redes neuronales artificiales para predecir la corrosividad.
4. Establecer una comparación entre las correlaciones matemáticas ya existentes y el valor predicho por medio de la herramienta computacional.

## **1.4 Justificación**

El fenómeno de la corrosión toma un papel muy importante al momento de estudiar el deterioro de los materiales por acciones del medio ambiente. Por eso, la corrosión atmosférica es una de las causas común responsable de la degradación de las estructuras dando como resultado gastos elevados de reparación y mantenimiento.

De tal manera, al momento de construcción de obras civiles en ambientes agresivos, se deben tomar medidas para lograr su mayor durabilidad, anteponiéndose ante todo tipo de accionamiento por parte de agentes externos tales como: ataques químicos, abrasión, entre otros. Se ha demostrado que es bastante engorroso trabajar con modelos estadísticos convencionales para la obtención de regresiones lineales, por eso se ha visto la necesidad del uso de la herramienta de redes neuronales artificiales. Previamente demostrado, con el uso

de dicha herramienta, se puede llegar a resultados bastantes razonables y precisos que aquellos obtenidos mediante por un modelo estadístico convencional.

En un orden de consideraciones técnicas, mientras la precisión del modelo en la predicción sea mayor, el mismo podría ayudar a identificar un intervalo de tiempo de mantenimiento adecuado o en el mejoramiento de diseño de las estructuras en cuanto a su resistencia o durabilidad.

Es por esto que el presente trabajo de investigación pretende, en el orden académico, establecer la situación actual de conocimiento y la capacidad de estudiar el fenómeno de corrosión junto a la arquitectura de redes neuronales artificiales mediante la experimentación de los conocimientos teóricos, científicos y técnicos adquiridos durante el proceso de enseñanza universitaria.

Finalmente, el estudio abre el espacio de interés, de tal manera, marcando el camino de utilidad para futuras investigaciones pertenecientes al tema, específicamente en el uso de las redes neuronales artificiales para el modelaje de correlaciones.

### **1.5 Limitaciones**

En todo proceso en el cual se realiza un trabajo investigativo se ven presentes ciertas restricciones limitando la realización de la misma. Existe la limitación del manejo de la herramienta computacional Joone, ya que el pensum de la carrera carece de una materia enfocada en la utilización o manejo de la misma. La posibilidad de realizar un ensayo en físico de la interacción de los agentes externos con las estructuras civiles a lo largo de la costa es realmente baja, debido a la escasez de equipo requerido y actualizado para la realización de dicho estudio.

### **1.6 Alcance**

El desarrollo de dicha investigación permitirá implementar las redes neuronales como una herramienta de gran utilidad para la predicción de corrosividad en las estructuras ubicadas en las costas de los estados Carabobo y Falcón. Teniendo al alcance la información primordialmente reflejada por la Institución Nacional de Meteorología e Hidrología.

Por lo tanto para permanecer dentro del alcance de la investigación, se realizaran acciones elementales metódicamente, ya declaradas como objetivos específicos: Establecer una relación entre la agresividad del medio ambiente y las estructuras civiles, diseñar las arquitecturas neuronales empleadas para la modelización de las variables de control, generar correlaciones con redes neuronales artificiales para predecir la corrosividad, y por último, establecer una comparación entre las correlaciones matemáticas ya existentes y el valor predicho por medio de la herramienta computacional.

## **CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Antecedentes de la investigación**

Al haberse planteado el problema y trazado el objetivo general y los específicos que determinaron los fines de la investigación, se ve la necesidad de establecer los aspectos teóricos que respaldan la investigación tomando en consideración las características y naturaleza del mismo con respecto a las variables a trabajar, como lo es la corrosión en estructuras civiles y el implemento de redes neuronales artificiales. En este orden de ideas, se precisaron diversos trabajos de investigación, que permitieron el uso fundamental como antecedentes, bases teóricas y conceptuales del fenómeno de corrosión de estructuras y redes neuronales artificiales.

Un primer estudio, llevado a cabo en la Universidad de Antioquia, están Velilla, E.; Villada, F. & Echeverria, F. (2009), en su artículo titulado **“Modelos de pérdida de masa de acero por corrosión atmosférica en Colombia usando inteligencia computacional”**, en donde los autores implementaron una metodología para la clasificación de la corrosividad de las diferentes atmósferas colombianas. Exponiendo placas de acero al carbono en 21 diferentes estaciones a lo largo de la infraestructura. Midiendo el tiempo de humectación, y la disposición de sulfatos y cloruro durante 12 meses. Clasificando las 21 estaciones en 4 grupos, tomando bajo consideración el tiempo de humectación, contenidos de cloruros y sulfatos, altura sobre el nivel del mar y el tiempo de exposición, implementaron el uso de redes neuronales artificiales para la pérdida de masa. Complementariamente presentando una comparación entre el modelo de RN con otros modelo obtenidos usando algoritmos genéticos.

Así mismo se puede tomar bajo consideración el estudio realizado en la Universidad Central de Venezuela por Barreiro, J. (2012) titulado **“Implementación de Redes Neuronales Artificiales para predecir presión de miscibilidad en la inyección de dióxido de carbono”**, la presente investigación

se llevó a cabo con el propósito de generar una correlación por medio de Redes Neuronales Artificiales (RNA) para predecir la PMM en la inyección de  $CO_2$ . Mediante la recolección de datos se definen parámetros para desarrollar la correlación como la temperatura del yacimiento, fracción de los componentes volátiles e intermedios presentes en el crudo. Posteriormente se realizó un análisis de sensibilidad respecto a distintos conjuntos de datos y número de neuronas en cada capa oculta, con el fin de definir la arquitectura final de la red. Finalmente, se estableció una comparación entre el error promedio obtenido por la red neuronal propuesta y las ecuaciones de la literatura, donde se encontró que la red neuronal resultó ser más exacta en sus predicciones.

Otro estudio, presentado en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, es el de Bolaños, E.; Pérez A.; Vega, G. & González, J. (2014), titulado **“Monitoreo de corrosión atmosférica de acero en el sureste mexicano aplicando redes neuronales artificiales”**, en este trabajo se determinaron modelos de pérdida de peso por corrosión atmosférica de acero al carbono en el sureste mexicano usando redes neuronales artificiales, tomando como variables de entrada el tiempo de humectación, contenidos de cloruros y sulfatos y como variable de salida la pérdida de peso del acero al carbono. Los resultados de este estudio muestran una forma complementaria para describir el proceso de corrosión atmosférica.

Finalmente, un último estudio que se puede tomar bajo consideración es el de Toro, M. (2019), presentada en la Universidad “José Antonio Páez” titulada **“Desarrollo de un sistema de detección y prevención de patologías en sistemas estructurales utilizados en la infraestructura urbana e industrial”**. La metodología de esta investigación se basa en el estudio documental en temas de durabilidad, diagnóstico de patologías y simulación de corrosión por medio de la herramienta de simulación computacional COMSOL Multiphysics, el cual tiene como fin la aplicación de los módulos de física acoplada que contiene el software para analizar temas en el área de pregrado de ingeniería mecánica. Se plantea un procedimiento sistematizado, que sirve de guía práctica para el uso del ingeniero que desee simular la patología asociada a la

corrosión. El procedimiento propuesto se realiza mediante una detección y simulación para evaluar las distintas condiciones que pueden afectar a un sistema.

## **2.2 Bases Teóricas**

### **2.2.1 Redes Neuronales Artificiales**

Diversos estudios han sido desarrollados para problemas en ciencia e ingeniería que implican la extracción de información a partir de datos complejos e inciertos. Para muchos de estos casos, las aproximaciones tradicionales no resultaron ser la mejor opción y es por esto que las Redes Neuronales Artificiales (RNA) fueron implementadas en la solución de este tipo de problemas. El primero en estudiar el cerebro desde el punto de vista computacional fue Alan Turing en 1936. Sin embargo, los pioneros para la construcción de modelos matemáticos que imitasen el comportamiento de las neuronas biológicas fueron Warren McCulloch y Walter Pitts, neurofísico y matemático respectivamente, que presentaron en 1943 uno de los primeros modelos abstractos de una neurona artificial. Luego en el año 1949, Donald Hebb propuso una técnica de entrenamiento para redes neuronales artificiales (RNA).

A partir de estos estudios, Frank Rosenblatt (1958) desarrolló un modelo sencillo conocido como perceptrón o perceptrón simple que tenía la capacidad de reconocer patrones. Sin embargo, la limitación de este tipo de red es que solo resolvía una limitada clase de problemas. Posteriormente, Bernard Widrow y Ted Hoff (1960) desarrollaron un nuevo algoritmo de aprendizaje con una capacidad y estructura similar al perceptrón de Rosenblatt, pero ambos modelos coincidieron en la misma limitación.

Para la década de los 60 el interés en las RNA disminuyó debido a la falta de ideas y computadoras aptas para experimentar con esta herramienta. Sin embargo, durante los 80 ambos impedimentos fueron superados y nuevos estudios fueron desarrollados para esta época. Es por esto que para el año 1982, John Hopfield desarrolló una red monocapa basada en los modelos de redes de McCulloch y Pitts. Posteriormente, Teuvo Kohonen (1984) desarrolló redes basadas en el aprendizaje competitivo, donde las unidades aprendieron a representar patrones de entrada similares. Finalmente para esta década de los 80,

fue descubierto por varios autores un algoritmo de entrenamiento para redes multicapa, pero el estudio que mayor influencia tuvo fue el publicado por David Rumelhart y James McClelland, donde desarrollaron un algoritmo de aprendizaje supervisado conocido como *Backpropagation* que permitía una solución poderosa en la construcción de RNA más complejas y evitar problemas desarrollados en el aprendizaje del perceptrón simple.

### **2.2.2 Definición de una red neuronal artificial**

Quizás, la definición de Red Neuronal más rigurosa sea la debida a Hech-Nielsen (1988):

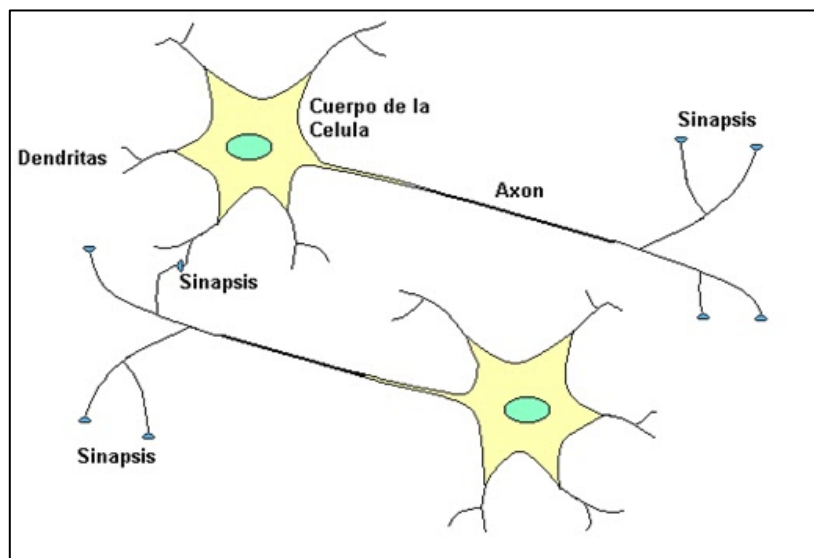
Una red neuronal es una estructura de procesamiento de información paralela y distribuida, formada por elementos de procesamiento interconectados mediante canales unidireccionales de información denominados conexiones. Cada elemento de procesamiento tiene una conexión de salida con diferentes ramas (tantas como sea necesaria) portadoras de la misma señal. Esta señal de salida será de un tipo matemático cualquiera. Todo el procesamiento que se hace en un elemento debe ser completamente local, por ejemplo: dependerá solo de los valores actuales de las entradas al elemento y de posibles valores en memoria local.

Por lo tanto, las redes neuronales artificiales pueden considerarse como modelos de cálculo caracterizados por algoritmos muy eficientes que operan de forma masivamente paralela y permiten desarrollar tareas cognitivas como el aprendizaje de patrones, la clasificación o la optimización.

Las redes neuronales artificiales son modelos que tratan de simular el comportamiento del cerebro humano y se caracterizan por el aprendizaje a través de la experiencia y la extracción de conocimiento genérico a partir de un conjunto de datos. El cerebro humano está formado por unos cien mil millones de elementos conectados llamados neuronas. Las neuronas tienen tres componentes principales: las dendritas, el cuerpo celular y el axón como se muestra en la Figura 1. Las dendritas son ramificaciones fibrosas que transportan las señales eléctricas en el cuerpo celular y reciben señales de entrada procedentes de otras neuronas. El axón en una única fibra larga que lleva la señal desde el cuerpo celular hacia otras neuronas y para transmitir la información, dicho axón se conecta a través de sus

ramificaciones con las dendritas de otras neuronas que reciben las señales y las combinan para producir nuevas salidas. El punto de contacto entre las dendritas y el axón de una neurona es llamado sinapsis y este determina la fuerza y tipo de relación entre ellas. Cabe destacar que la sinapsis es unidireccional, es decir, la información fluye siempre en un único sentido.

Finalmente, desde el punto de vista funcional, las neuronas constituyen procesadores de información sencillos integrados por un canal de recepción de información (dendritas), un órgano de cómputo (núcleo) y un canal de salida (axón).

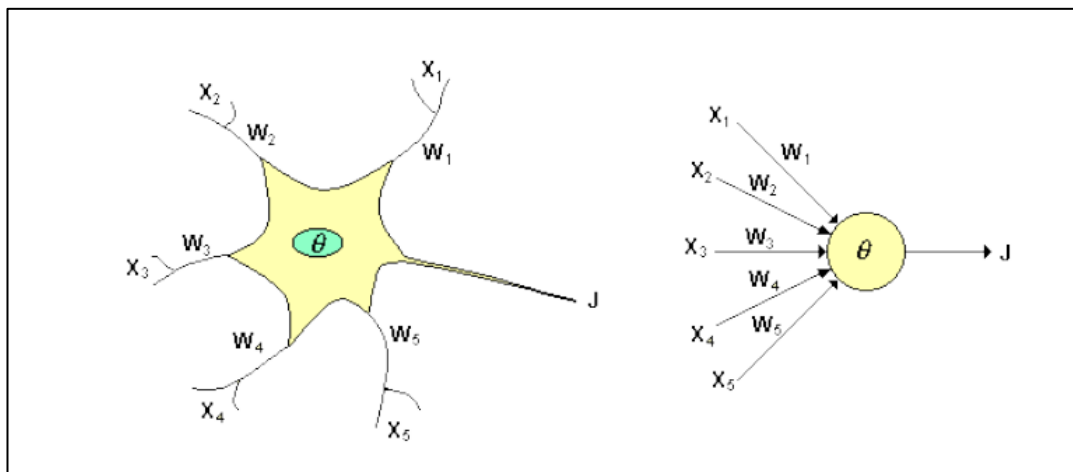


**Figura 1. Neurona Biológica**  
*Fuente:Acosta, María y otros, 2000*

Las redes neuronales artificiales no se acercan a la complejidad del cerebro humano. Sin embargo, existen ciertas semejanzas entre lo biológico y lo artificial tal como se muestra en la Figura 2 donde se observa una analogía entre una neurona artificial y una biológica.

A través de las dendritas, las entradas  $X_i$  representan las señales que provienen de otras neuronas, que a su vez están conectadas a las salidas de otras neuronas por medio de la sinapsis. La sinapsis, altera la efectividad con la que la señal es transmitida a través de un parámetro conocido como peso sináptico ( $w_i$ ). Los pesos sinápticos equivalen en la neurona biológica a los mecanismos que

existen en la misma para transmitir la señal, amplían o atenúan el valor del estímulo por el cual es multiplicado, posteriormente se combinan con la función transferencia que nos dará el nivel de potencial de la neurona para que luego se transmita la información a lo largo de la red. La salida de la función de red es evaluada en la función de activación que da lugar a la salida de la unidad de proceso.



**Figura 2.** Comparación entre neurona artificial y neurona biológica.

*Fuente:* <http://proton.ucting.udg.mx>

### 2.2.3 Características de las Redes Neuronales Artificiales

Debido a su constitución y a sus fundamentos, las redes neuronales artificiales presentan un gran número de características semejantes a las del cerebro. Por ejemplo, son capaces de aprender de la experiencia, de generalizar de casos anteriores a nuevos casos, de abstraer características esenciales a partir de entradas que representan información irrelevante, etc. Esto hace que ofrezcan numerosas ventajas y que este tipo de tecnología se esté aplicando en múltiples áreas. Entre las ventajas se incluyen:

- **Procesamiento en paralelo:** El procesamiento distribuido en paralelo es una teoría sobre el aprendizaje que propone una explicación a la adquisición del conocimiento, basado en procesos neuronales que tienen lugar en el cerebro. La información no se procesa únicamente en forma secuencial sino simultáneamente en un extenso conjunto de redes

neuronales. Esto ocurre debido a que el conocimiento se encuentra distribuido en diferentes neuronas, es decir, todas las neuronas aprenden distintos rasgos de los patrones que fueron presentados y cada una de ellas se encarga de calcular una función elemental sin necesidad de cooperar con las demás.

- **Memoria distribuida:** En un sistema convencional de computación la información está en posiciones de memoria bien definidas, en cambio en las RNA la información se encuentra distribuida por la sinapsis de la red, es decir, un dato no se encuentra en un único sitio sino repartido a lo largo de toda la estructura. Por lo tanto, se redunda para evitar pérdida de información al resultar dañada la comunicación entre neuronas.
- **Aprendizaje adaptivo:** La capacidad de aprendizaje adaptativo es una de las características más atractivas de redes neuronales. Esto es, aprenden a llevar a cabo ciertas tareas mediante un entrenamiento con ejemplos ilustrativos. Como las redes neuronales pueden aprender a diferenciar patrones mediante ejemplos y entrenamientos, no es necesario elaborar modelos a priori ni necesidad de especificar funciones de distribución de probabilidad. Las redes neuronales son sistemas dinámicos autoadaptativos. Son adaptables debido a la capacidad de autoajuste de los elementos procesales (neuronas) que componen el sistema. Son dinámicos, pues son capaces de estar constantemente cambiando para adaptarse a las nuevas condiciones. La función del diseñador es únicamente la obtención de la arquitectura apropiada.
- **Auto-organización:** Las redes neuronales emplean su capacidad de aprendizaje adaptativo para autoorganizar la información que reciben durante el aprendizaje y/o la operación. Mientras que el aprendizaje es la modificación de cada elemento procesal, la autoorganización consiste en la modificación de la red neuronal completa para llevar a cabo un objetivo específico.
- **Tolerancia a falla:** Las redes neuronales poseen una alta capacidad de tolerancia a fallas, puede ser con respecto a los datos (distorsión, ruido o

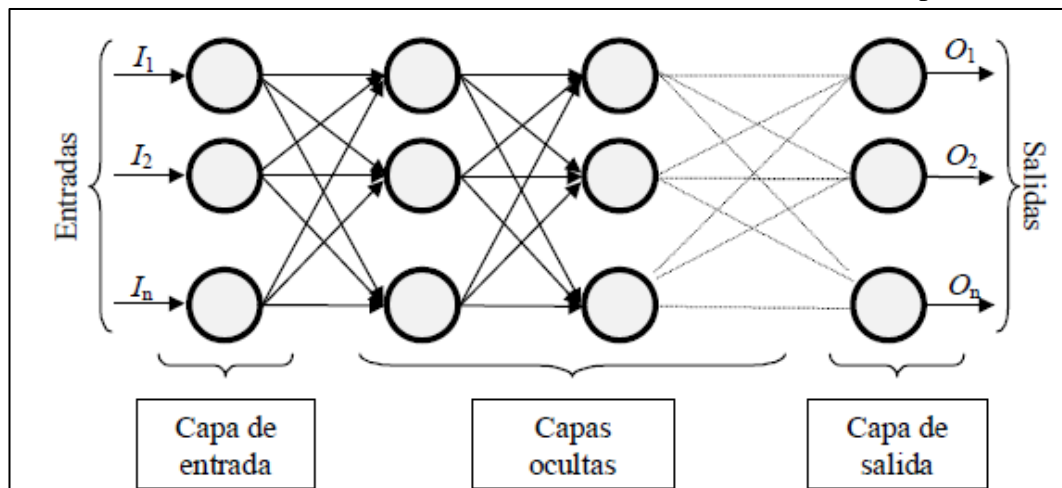
datos incompletos) o tener fallas con respecto a la estructura. En los sistemas computacionales tradicionales, cuando estos tienen errores de memoria pierden parte de su funcionalidad, además de almacenar la información en espacios únicos localizados. A diferencia de estos sistemas tradicionales, las redes neuronales no sufren una caída repentina de la misma si llegan a tener fallas en algunas de sus neuronas por alto el grado de redundancia con que trabajan.

- **Operación en tiempo real:** Una de las mayores prioridades, casi en la totalidad de las áreas de aplicación, es la necesidad de realizar procesos con datos de forma muy rápida. Las redes neuronales se adaptan bien a esto debido a su implementación paralela. Para que la mayoría de las redes puedan operar en un entorno de tiempo real, la necesidad de cambio en los pesos de las conexiones o entrenamiento es mínimo.

## 2.2.4 Elementos básicos que componen una red neuronal

### 2.2.4.1 Neurona Artificial

La distribución de las neuronas dentro de la red depende de los niveles o números de capas que contenga tal como se muestra en la Figura 3, donde cada nodo o neurona únicamente está conectada con neuronas de un nivel superior.



**Figura 3.** Ejemplo de una red neuronal totalmente conectada

*Fuente: Matich, 2001*

Comúnmente una neurona, aunque con muchas entradas, no es suficiente y por lo tanto se necesitan una serie de ellas que funcionen en paralelo en una capa

o nivel, cuyas entradas provienen de otra capa de neuronas y cuyas salidas se dirigen al mismo destino. Las neuronas se encuentran interconectadas entre sí formando diferentes topologías para resolver distintos problemas. Una RNA típica tiene tres tipos de neuronas:

- **Neuronas de entrada:** se encuentran en la capa de entrada y reciben la información de fuentes externas a la propia red.
- **Neuronas ocultas:** sus señales permanecen dentro de la red, no tienen ninguna relación directa con la información de entrada ni con la de salida. Este tipo de neuronas pueden formar una o más capas ocultas.
- **Neuronas de salida:** ofrecen señales o información fuera de la red dando respuesta al sistema una vez que se haya procesado la información.

En la Figura 4 se ilustra un esquema del proceso que se lleva a cabo en una red neuronal, donde se puede observar que la misma cuenta con cierta cantidad de parámetros de entrada ( $x_0, x_1 \dots x_n$ ) que provienen del exterior o de otras neuronas. A su vez, cuenta con una salida que transmite la información al exterior de la red o a otras neuronas. La señal de salida se calculará en función de las entradas, para lo cual cada una de ellas es afectada por una ganancia o peso que determina la fuerza de la conexión, conocido como peso sináptico ( $w_0, w_1 \dots w_n$ ). Estos pesos pueden ser positivos (excitatorios) o negativos (inhibitorios) y van cambiando libremente en función del tiempo y en cada una de las neuronas que se encuentran en la red, es decir, estos pesos no tienen un valor constante, sino que van variando en función de un determinado algoritmo hasta que adoptan un valor constante. Esto se conoce como regla de aprendizaje y es de gran importancia, ya que el conocimiento de la red estará en dichos pesos.

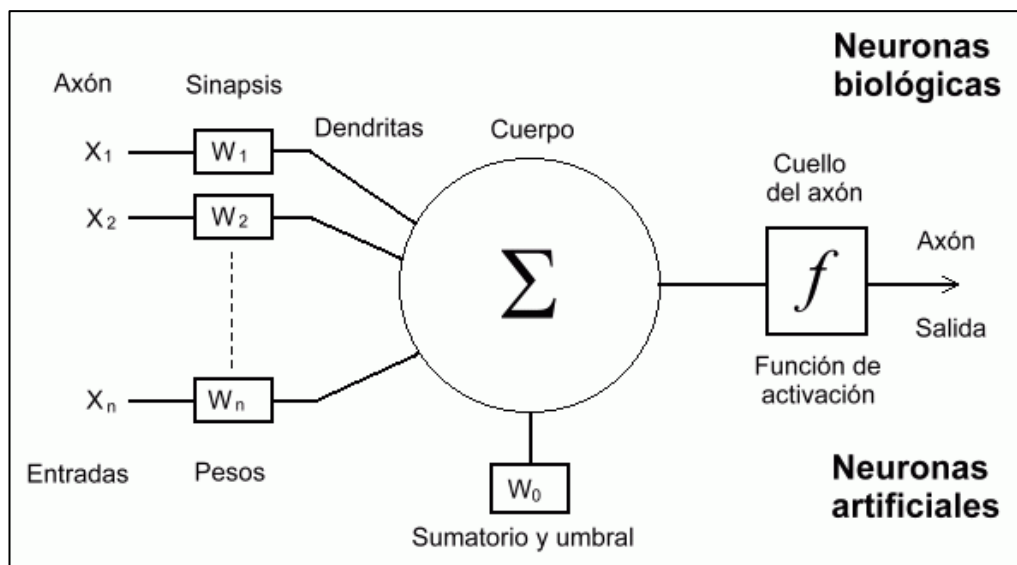
Posteriormente, el nodo realiza una suma de todas las señales de entrada multiplicadas por los pesos y luego el resultado es evaluado por la función transferencia para generar la salida de la red. La entrada neta en cada unidad del sistema viene representada por la suma de los pesos, multiplicado por los parámetros de entrada ( $x_0, x_1 \dots x_n$ ), resultando en la siguiente ecuación:

$$X_{neta} = \sum_{i=1}^n w_i \times x_i \quad \text{Ec.1}$$

Luego que se ha calculado la activación del nodo, el valor de la salida sería:

$$y_i = f_i(X_{neta}) \quad \text{Ec.2}$$

Donde  $f_i$  viene siendo la función activación para esa capa y depende de la función que sea utilizada para transformar la entrada  $X_{neta}$  en un valor de salida  $y_i$ .



**Figura 4.** Proceso de una red neuronal.

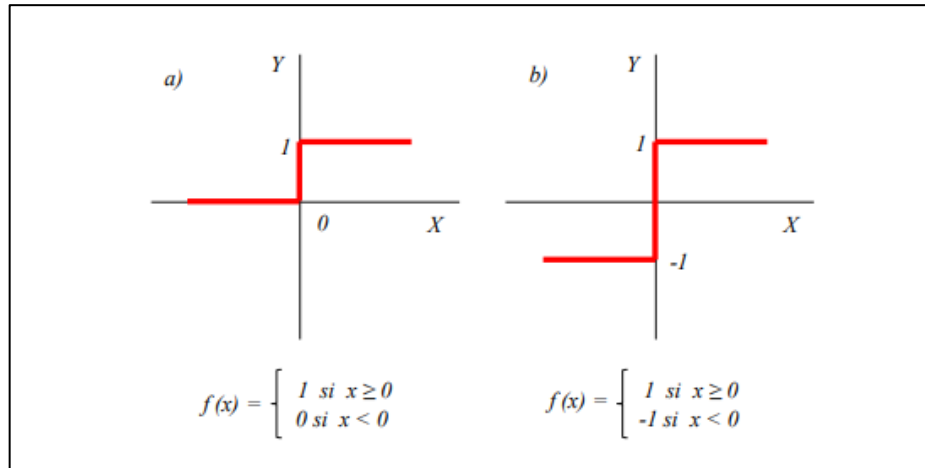
*Fuente:* <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=72>

#### 2.2.4.2 Función transferencia

Además de los pesos y las conexiones, cada neurona tiene asociada una función matemática denominada función transferencia. Dicha función genera la señal de salida de la neurona a partir de las señales de entrada. Entre las funciones más utilizadas en los distintos tipos de neuronas tenemos:

- **Función Escalón o Heaviside:** se asocia a neuronas binarias en donde la salida de la misma solo se activa cuando dicho estado de activación es mayor o igual que el umbral de la neurona, tal como se muestra en el caso a) de la Figura 5 donde la función lleva la salida de la red a cero si el argumento es menor que cero o la lleva a uno si argumento es mayor o igual a la unidad. También existe una modificación de esta

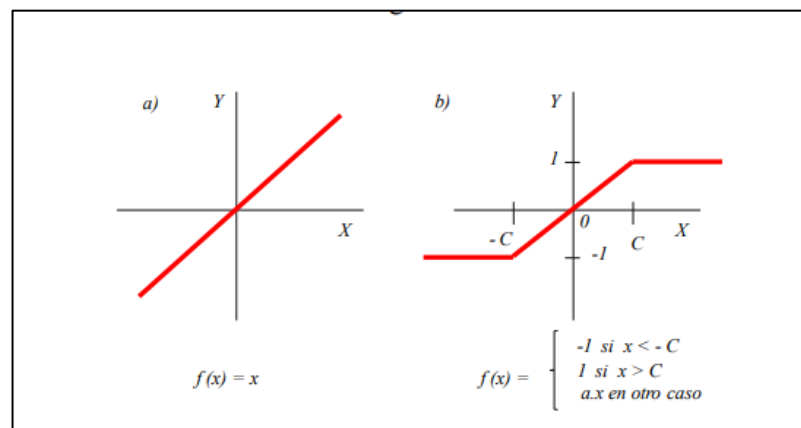
función que puede observarse en el caso b) donde la función de transferencia escalón simétrica restringe el espacio de salida a valores entre uno y menos uno.



**Figura 5.** Funciones transferencia. a) Hardlim, b) Hardlims

*Fuente: Demuth et al, 1996*

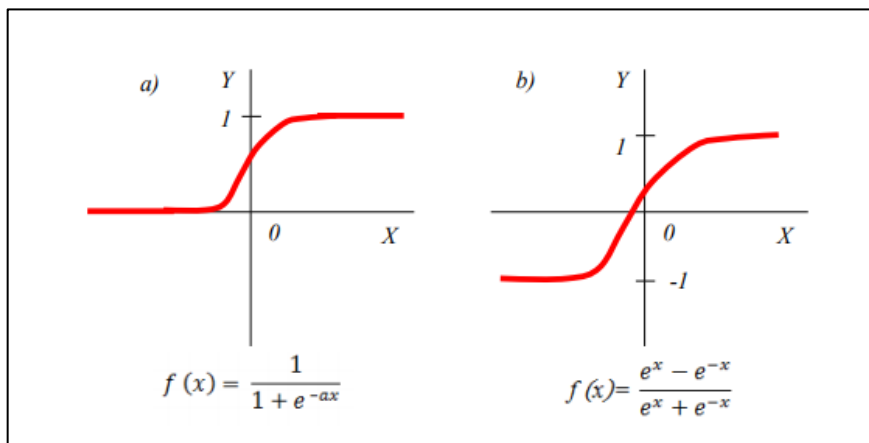
- **Función Identidad o Lineal:** función útil para la regresión lineal, es una de las más sencillas. Su salida es igual a su entrada, tal como lo muestra la figura 6.



**Figura 6.** Función transferencia a) lineal, b) mixta

*Fuente: Demuth et al, 1996*

- **Función Sigmoidal:** Como se puede ver en la figura 7, toma valores de entrada que pueden oscilar entre más y menos infinito, y restringe los valores de la salida entre cero y uno de acuerdo la expresión.
- **Función Tangente Hiperbólica:** Los valores de salida de la función tangente hiperbólica están comprendidos dentro de un rango que va de -1 a 1.



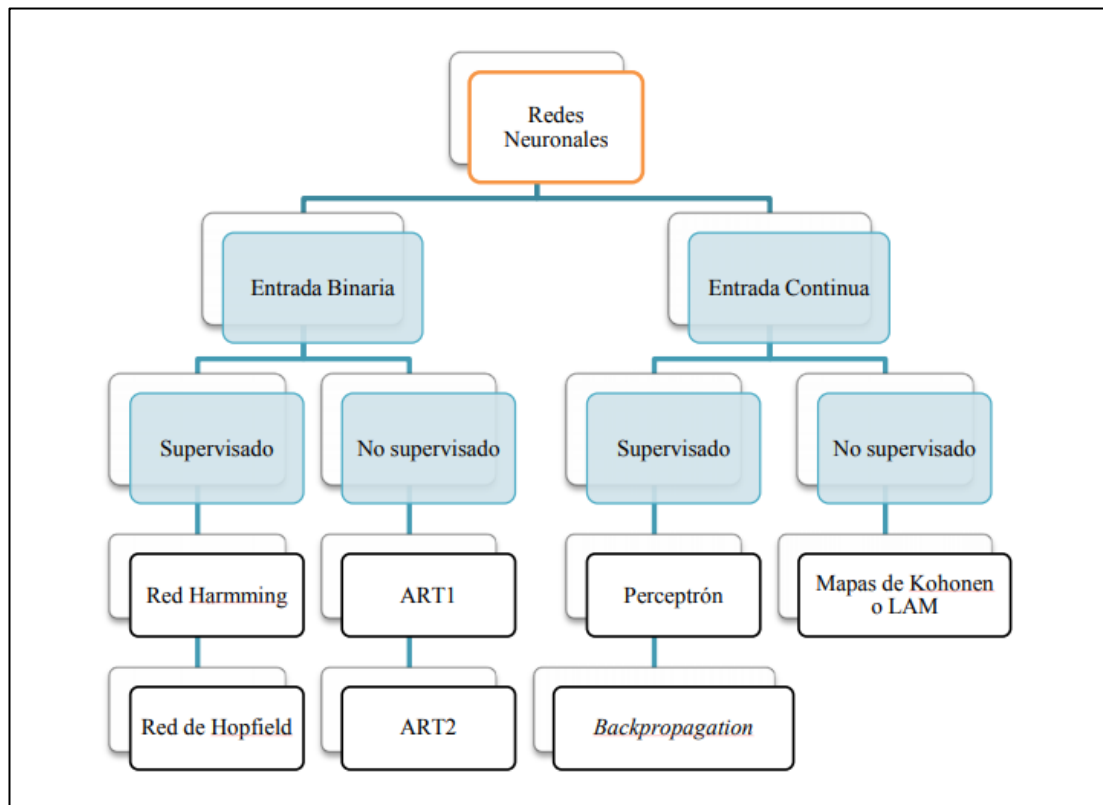
**Figura 7.** Función transferencia a) Sigmoidal, b) Tangente Hiperbólica  
*Fuente: Demuth et al, 1996*

### Tipos de neuronas artificiales

Las neuronas artificiales se pueden clasificar de acuerdo a los valores que pueden tomar. Por ahora es suficiente distinguir entre dos tipos principales:

- Neuronas binarias.
- Neuronas reales.

Las neuronas binarias solamente pueden tomar valores dentro del intervalo  $\{0, 1\}$  o  $\{-1, 1\}$ , mientras que las neuronas reales pueden hacerlo dentro del rango  $[0, 1]$  o  $[-1, 1]$ . Los pesos normalmente no están restringidos a un cierto intervalo, aunque para aplicaciones específicas puede ser esto necesario. En la figura 8 se ilustra un esquema de la clasificación de redes neuronales.



**Figura 8.** Clasificación de las redes neuronales artificiales  
 Fuente: <http://proton.ucting.udg.mx>

### 2.2.5 Mecanismos de aprendizaje

Una red neuronal debe aprender a calcular la salida correcta para cada constelación (arreglo o vector) de entrada en el conjunto de ejemplos. Este proceso de aprendizaje se denomina: proceso de entrenamiento o acondicionamiento. El conjunto de datos (o conjunto de ejemplos) sobre el cual este proceso se basa es, por ende, llamado: conjunto de datos de entrenamiento.

Si la topología de la red y las diferentes funciones de cada neurona (entrada, activación y salida) no pueden cambiar durante el aprendizaje, mientras que los pesos sobre cada una de las conexiones si pueden hacerlo; el aprendizaje de una red neuronal significa: adaptación de los pesos.

En otras palabras el aprendizaje es el proceso por el cual una red neuronal modifica sus pesos en respuesta a una información de entrada. Los cambios que se producen durante el mismo se reducen a la destrucción, modificación y creación de conexiones entre las neuronas. En los sistemas biológicos existe una continua

destrucción y creación de conexiones entre las neuronas. En los modelos de redes neuronales artificiales, la creación de una nueva conexión implica que el peso de la misma pasa a tener un valor distinto de cero. De la misma manera, una conexión se destruye cuando su peso pasa a ser cero.

Durante el proceso de aprendizaje, los pesos de las conexiones de la red sufren modificaciones, por lo tanto, se puede afirmar que este proceso ha terminado (la red ha aprendido) cuando los valores de los pesos permanecen estables ( $dw_{ij}/dt = 0$ ). Un aspecto importante respecto al aprendizaje de las redes neuronales es el conocer cómo se modifican los valores de los pesos, es decir, cuáles son los criterios que se siguen para cambiar el valor asignado a las conexiones cuando se pretende que la red aprenda una nueva información. Hay dos métodos de aprendizaje importantes que pueden distinguirse:

- a) Aprendizaje supervisado.
- b) Aprendizaje no supervisado.

Otro criterio que se puede utilizar para diferenciar las reglas de aprendizaje se basa en considerar si la red puede aprender durante su funcionamiento habitual o si el aprendizaje supone la desconexión de la red, es decir, su inhabilitación hasta que el proceso termine. En el primer caso, se trataría de un aprendizaje on line, mientras que el segundo es lo que se conoce como off line. Cuando el aprendizaje es off line, se distingue entre una fase de aprendizaje o entrenamiento y una fase de operación o funcionamiento, existiendo un conjunto de datos de entrenamiento y un conjunto de datos de test o prueba, que serán utilizados en la correspondiente fase. Además, los pesos de las conexiones permanecen fijos después que termina la etapa de entrenamiento de la red. Debido precisamente a su carácter estático, estos sistemas no presentan problemas de estabilidad en su funcionamiento.

Una generalización de la fórmula o regla para decir los cambios en los pesos es la siguiente:

$$\text{Peso Nuevo} = \text{Peso Viejo} + \text{Cambio de Peso}$$

Matemáticamente esto es:

$$w_{ij}(t + 1) = w_{ij}(t) +$$

donde  $t$  hace referencia a la etapa de aprendizaje,  $w_{ij}(t + 1)$  al peso nuevo y  $w_{ij}(t)$  al peso viejo.

### 2.2.5.1 Aprendizaje supervisado

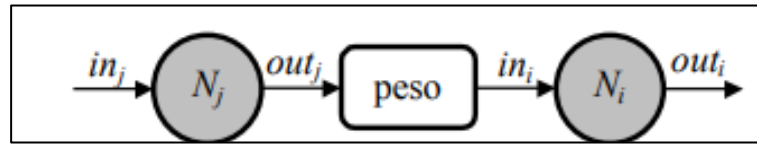
El aprendizaje supervisado se caracteriza porque el proceso de aprendizaje se realiza mediante un entrenamiento controlado por un agente externo (supervisor, maestro) que determina la respuesta que debería generar la red a partir de una entrada determinada. El supervisor controla la salida de la red y en caso de que ésta no coincida con la deseada, se procederá a modificar los pesos de las conexiones, con el fin de conseguir que la salida obtenida se aproxime a la deseada. En este tipo de aprendizaje se suelen considerar, a su vez, tres formas de llevarlo a cabo, que dan lugar a los siguientes aprendizajes supervisados:

- 1) **Aprendizaje por corrección de error:** Consiste en ajustar los pesos de las conexiones de la red en función de la diferencia entre los valores deseados y los obtenidos a la salida de la red, es decir, en función del error cometido en la salida. Un ejemplo de este tipo de algoritmos lo constituye la regla de aprendizaje del Perceptron, utilizada en el entrenamiento de la red del mismo nombre que desarrolló Rosenblatt en 1958 [Rosenblatt 58]. Esta es una regla muy simple, para cada neurona en la capa de salida se le calcula la desviación a la salida que se utiliza para cambiar los pesos sobre la conexión de la neurona precedente. El cambio de los pesos por medio de la regla de aprendizaje del Perceptron se realiza según la siguiente regla:

$$w_{ij} = \sigma \times out_j \times (a_{qi} - out_i) \quad \text{Ec.4}$$

donde:  $a_{qi}$  es la salida deseada/objetivo de la neurona de salida  $N_i$ ,  $\delta_i = (a_{qi} - out_i)$  la desviación objetivo de la neurona  $N_i$  y  $\sigma$  el aprendizaje.

La salida de la neurona  $N_j(out_j)$  se utiliza, porque este valor influye en la entrada global y, por ende, en la activación y luego en la salida de la neurona  $N_i$ . Esto es semejante a un “efecto en cadena”, tal cual mostrado en la figura 9.

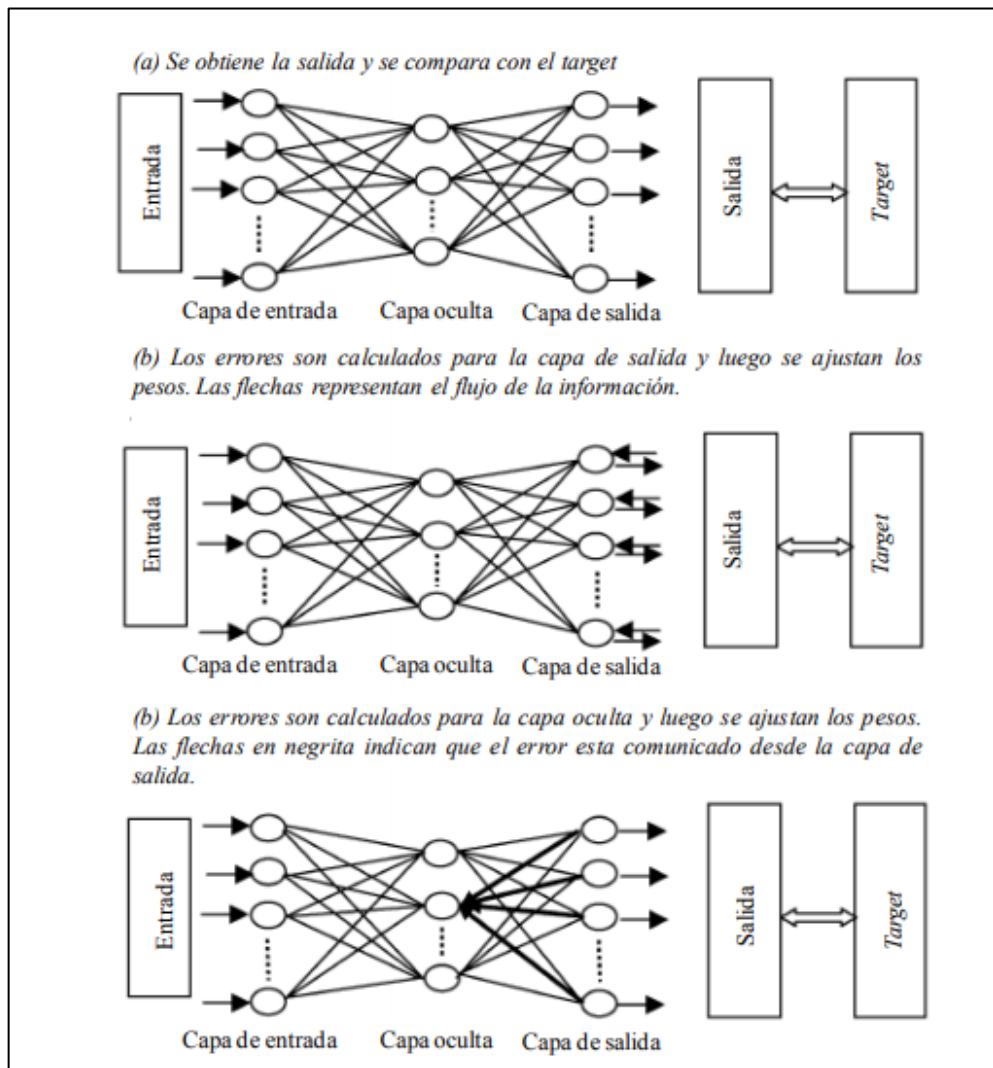


**Figura 9.** Influencia de la salida de la neurona  $N_j$  en la entrada de la neurona  $N_i$ .  
*Fuente: Matich, 2001*

Otro algoritmo muy conocido y que pertenece a esta clasificación es la regla de aprendizaje Delta o regla del mínimo error cuadrado (LMS Error: Least Mean Squared Error), que también utiliza la desviación a la salida objetivo, pero toma en consideración a todas las neuronas predecesoras que tiene la neurona de salida. Esto permite cuantificar el error global cometido en cualquier momento durante el proceso de entrenamiento de la red, lo cual es importante, ya que cuanto más información se tenga sobre el error cometido, más rápido se puede aprender.

neuronas predecesoras.

Por último se debe mencionar la regla de aprendizaje de propagación hacia atrás o de *backpropagation*, también conocido como regla LMS multicapa, la cual es una generalización de la regla de aprendizaje Delta. Esta es la primera regla de aprendizaje que permitió realizar cambios sobre los pesos en las conexiones de la capa oculta, como se ilustra en la figura 10.



**Figura 10.** Dinámica básica de retro propagación de errores

*Fuente: Huang et ál, 2003*

- 1) **Aprendizaje por refuerzo:** Se trata de un aprendizaje supervisado, más lento que el anterior, que se basa en la idea de no disponer de un ejemplo completo del comportamiento deseado, es decir, de no indicar durante el entrenamiento exactamente la salida que se desea que proporcione la red ante una determinada entrada. En el aprendizaje por refuerzo la función del supervisor se reduce a indicar mediante una señal de refuerzo si la salida obtenida en la red se ajusta a la deseada (éxito = +1 o fracaso = -1), y en función de ello se ajustan los pesos basándose en un mecanismo de probabilidades.

**2) Aprendizaje estocástico:** Consiste básicamente en realizar cambios aleatorios en los valores de los pesos de las conexiones de la red y evaluar su efecto a partir del objetivo deseado y de distribuciones de probabilidad. En el aprendizaje estocástico se suele hacer una analogía en términos termodinámicos, asociando a la red neuronal con un sólido físico que tiene cierto estado energético. En el caso de la red, la energía de la misma representaría el grado de estabilidad de la red, de tal forma que el estado de mínima energía correspondería a una situación en la que los pesos de las conexiones consiguen que su funcionamiento sea el que más se ajusta al objetivo deseado.

Según lo anterior, el aprendizaje consistiría en realizar un cambio aleatorio de los valores de los pesos y determinar la energía de la red (habitualmente la función energía es una función de Liapunov). Si la energía es menor después del cambio, es decir, si el comportamiento de la red se acerca al deseado, se acepta el cambio; si, por el contrario, la energía no es menor, se aceptaría el cambio en función de una determinada y preestablecida distribución de probabilidades.

#### **2.2.5.2 Aprendizaje no supervisado**

Las redes con aprendizaje no supervisado (también conocido como autosupervisado) no requieren influencia externa para ajustar los pesos de las conexiones entre sus neuronas. La red no recibe ninguna información por parte del entorno que le indique si la salida generada en respuesta a una determinada entrada es o no correcta. Estas redes deben encontrar las características, regularidades, correlaciones o categorías que se puedan establecer entre los datos que se presenten en su entrada. Existen varias posibilidades en cuanto a la interpretación de la salida de estas redes, que dependen de su estructura y del algoritmo de aprendizaje empleado.

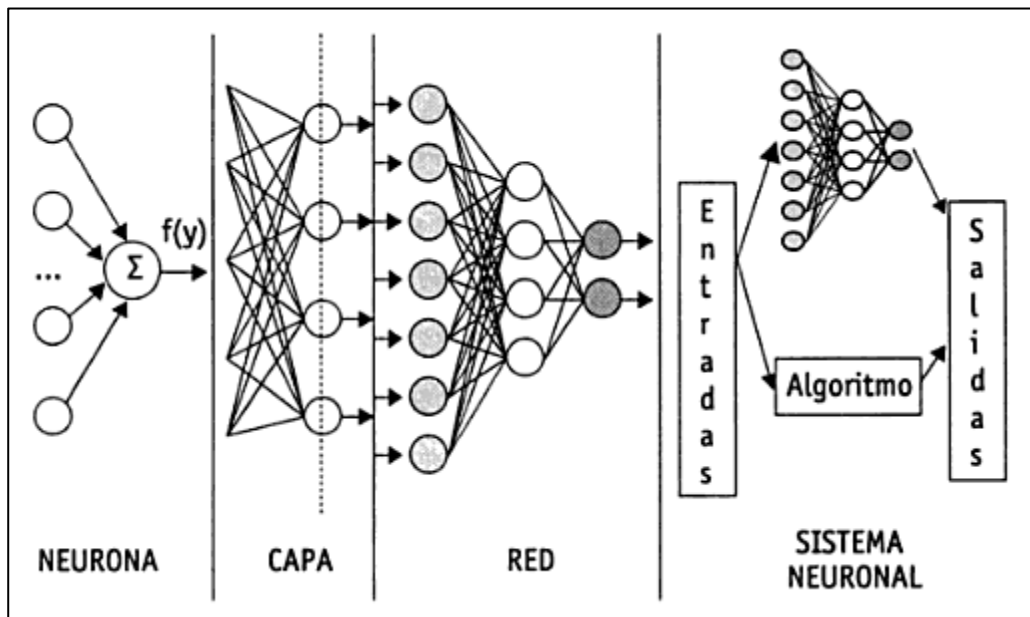
En algunos casos, la salida representa el grado de familiaridad o similitud entre la información que se le está presentando en la entrada y las informaciones que se le han mostrado hasta entonces (en el pasado). En otro caso, podría realizar una clusterización (*clustering*) o establecimiento de categorías, indicando la red a

la salida a qué categoría pertenece la información presentada a la entrada, siendo la propia red quien debe encontrar las categorías apropiadas a partir de las correlaciones entre las informaciones presentadas. En cuanto a los algoritmos de aprendizaje no supervisado, en general se suelen considerar dos tipos, que dan lugar a los siguientes aprendizajes:

- 1) **Aprendizaje hebbiano:** Esta regla de aprendizaje es la base de muchas otras, la cual pretende medir la familiaridad o extraer características de los datos de entrada. El fundamento es una suposición bastante simple: si dos neuronas  $N_i$  y  $N_j$  toman el mismo estado simultáneamente (ambas activas o ambas inactivas), el peso de la conexión entre ambas se incrementa. Las entradas y salidas permitidas a la neurona son:  $\{-1, 1\}$  o  $\{0, 1\}$  (neuronas binarias).
- 2) **Aprendizaje competitivo y comparativo:** Se orienta a la clusterización o clasificación de los datos de entrada. Como característica principal del aprendizaje competitivo se puede decir que, si un patrón nuevo se determina que pertenece a una clase reconocida previamente, entonces la inclusión de este nuevo patrón a esta clase matizará la representación de la misma. Si el patrón de entrada se determinó que no pertenece a ninguna de las clases reconocidas anteriormente, entonces la estructura y los pesos de la red neuronal serán ajustados para reconocer la nueva clase.

### **2.2.6 Topología de una red neuronal artificial**

La topología o arquitectura de una red neuronal consiste en la organización y disposición de las neuronas para formar capas con varias de ellas tal como se muestra en la Figura 11. Para esto se debe tomar en cuenta los parámetros fundamentales en una red tales como el número de capas, número de neuronas, grado de conectividad y el tipo de conexión entre las neuronas.



**Figura 11.** Estructura de un sistema basado en redes neuronales.

*Fuente: Flórez y Fernández, 2008*

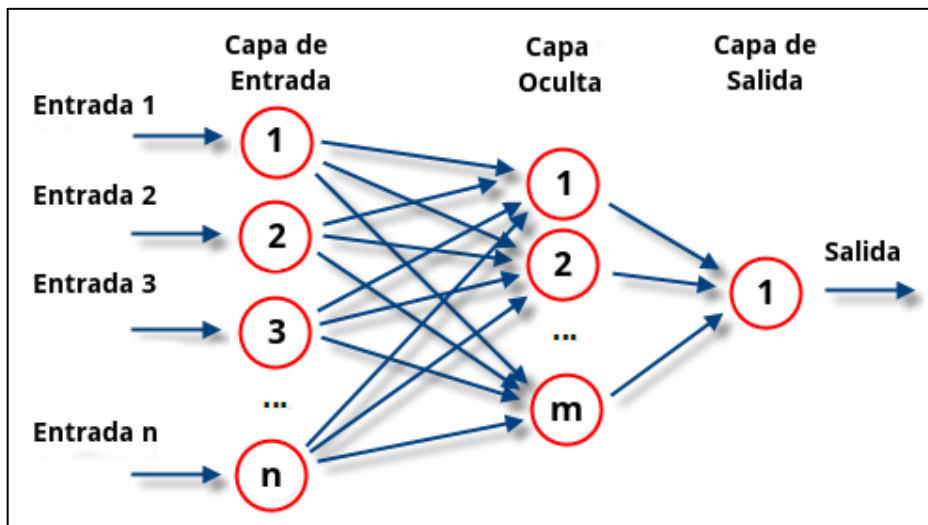
El sistema neuronal artificial son un conjunto de procesadores elementales (neuronas artificiales), conectados a otras neuronas o bien a entradas externas con una salida que permite propagar señales por múltiples caminos. Un conjunto de neuronas artificiales cuyas entradas provienen de la misma fuente y las salidas se dirigen al mismo destino, comprenden un conjunto de neuronas que constituyen una capa o nivel. Un sistema neuronal está formado básicamente por los siguientes elementos:

- Un conjunto de procesadores elementales o neuronas artificiales. - Un patrón de conectividad, arquitectura o topología.
- Una dinámica de activaciones.
- Una regla dinámica de aprendizaje.
- El entorno donde estas operan.

**a) Conexión entre neuronas**

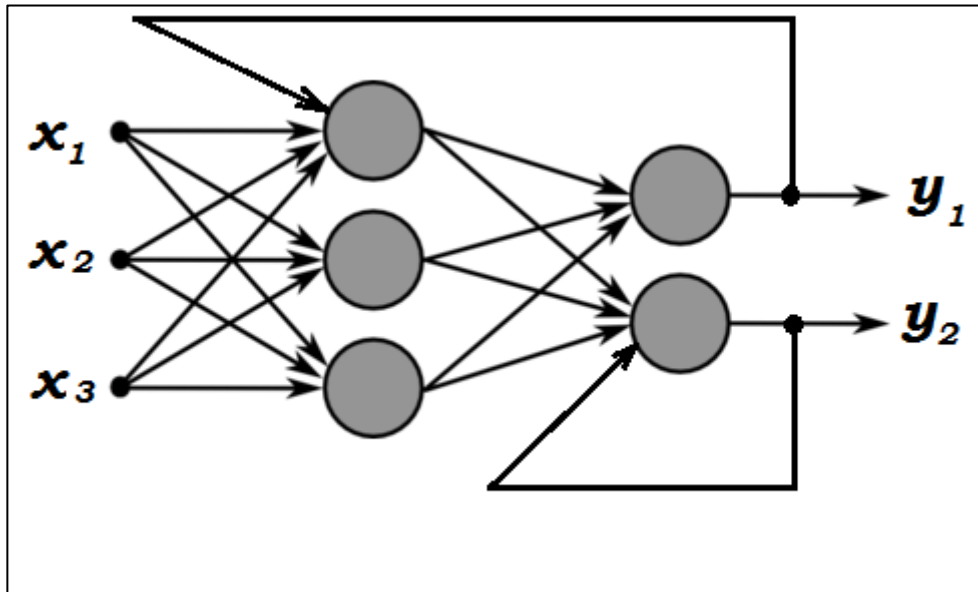
La conexión entre las neuronas viene relacionada con la forma en que las salidas de las mismas están canalizadas para convertirse en entradas de otras neuronas y estas conexiones funcionan como caminos unidireccionales. La señal de salida de una neurona puede ser una entrada de otro elemento de proceso o

incluso ser una entrada de sí mismo (conexión auto-recurrente). Las redes multicapa están formadas por varios niveles de neuronas. Cuando la salida de las mismas no es entrada de otras neuronas del mismo nivel o de niveles precedentes, es decir, los datos de las neuronas de una capa inferior son propagados hacia las neuronas de la capa superior de la red, se le conoce como propagación hacia adelante o *feedforward* como se muestra en la figura 12.

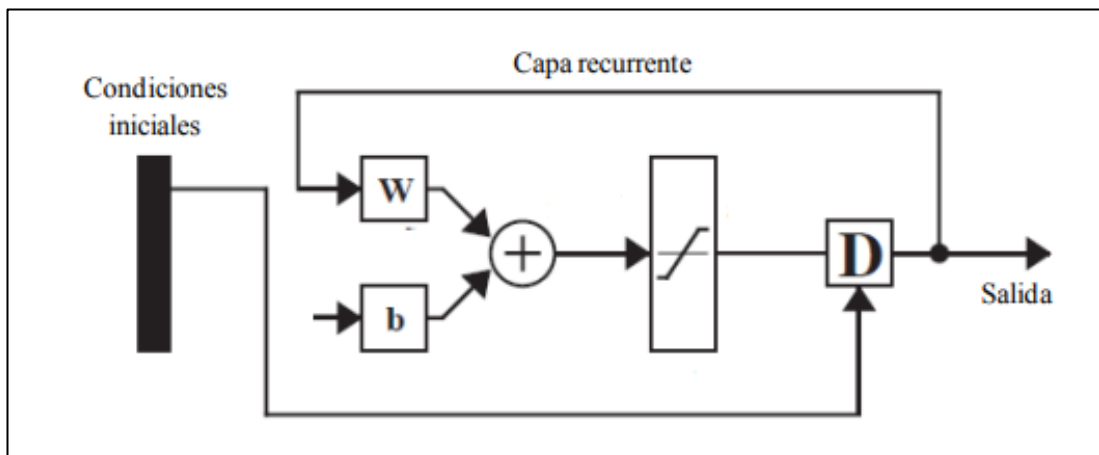


**Figura 12.** Red con propagación hacia adelante o *feedforward*  
Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Perceptr%C3%B3n\\_multicapa](https://es.wikipedia.org/wiki/Perceptr%C3%B3n_multicapa)

En el caso contrario, si las neuronas se encuentran conectadas en las entradas de otras de niveles previos o del mismo nivel y las conexiones llevan datos de las neuronas de una capa superior a otras de la capa inferior, la red es de propagación hacia atrás o *feedback* como se observa en la Figura 13. Por otra parte, existen redes de propagación hacia atrás que tienen lazos cerrados. Estas redes son conocidas como sistemas recurrentes y se muestra en la Figura 14.

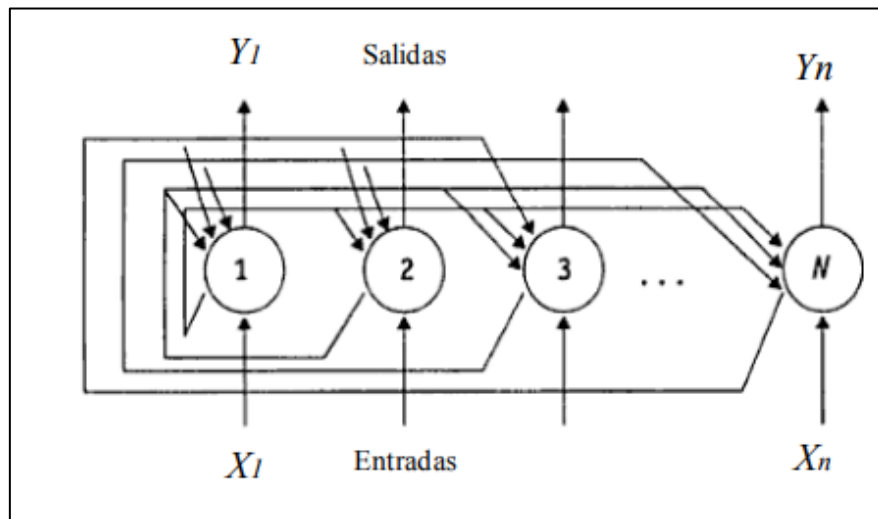


**Figura 13.** Red con propagación hacia atrás o *feedback*.  
*Fuente: Fernández, 2013*



**Figura 14.** Red recurrente.  
*Fuente: Demuth et al, 1996*

Las redes monocapa son redes que poseen un solo nivel. La unión entre las neuronas se lleva a cabo mediante conexiones laterales y de esta manera se conectan unas con otras en una misma capa como se muestra en la Figura 15. Las más representativas son las redes de Hopfield y las máquinas estocásticas de Boltzmann y Cauchy.

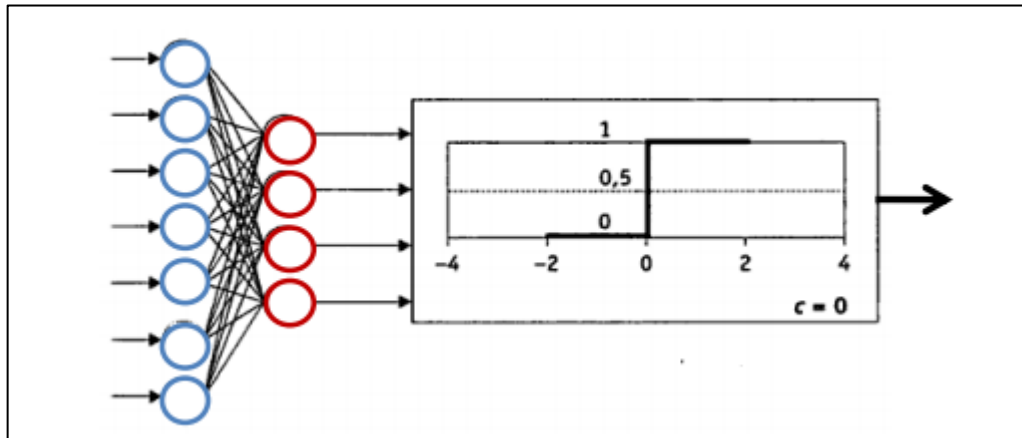


**Figura 15.** Red de Hopfield  
*Fuente: Flores y Fernández, 2008*

Finalmente, cuando la salida de una neurona de una capa es entrada de todas las neuronas de la capa siguiente se denomina red totalmente conectada, si se conecta solamente con algunas neuronas estamos en presencia de una red localmente conectada.

### 2.2.7 Perceptrón simple

El modelo de RNA conocido como Perceptrón o Perceptrón Simple, ilustrado en la figura 16, fue introducido por Rosenblatt en el año 1958. Fue inspirado en las primeras etapas de procesamiento del sistema sensorial animal y basado en el modelo de McCulloch y Pitts, junto con la regla de aprendizaje por corrección de error. El perceptrón simple es una red que consta de dos capas de neuronas. La primera capa tiene como función hacer de sensor, es decir, por ella van a entrar las señales a la red y la segunda capa realiza todo el procesamiento. Cada neurona del primer nivel está unida con todas las del segundo nivel.



**Figura 16.** Perceptrón simple  
*Fuente: Flores y Fernández, 2008*

## 2.2.8 Introducción al concreto armado

### 2.2.8.1 Concreto

El concreto es un material que está constituido por dos partes: Una es un producto pastoso y moldeable, que tiene la capacidad de endurecer con el tiempo, y la otra parte son agregados pétreos que quedan englobados en esta pasta. A su vez, la pasta está constituida por agua y un producto aglomerante o conglomerante que es el cemento. El agua cumple con 2 misiones, una es dar fluidez al concreto para que sea más fácil de trabajar y adopte distintas formas, y la otra es la de reaccionar químicamente con el cemento para lograr su posterior endurecimiento.

### 2.2.8.2 Componentes del concreto

El concreto de uso común, o convencional, se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales, cemento, agua y agregados, a los cuales eventualmente se incorpora un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo. La mezcla íntima de los componentes del concreto convencional produce una masa plástica que puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad; pero gradualmente pierde esta característica hasta que al cabo de algunas horas se torna rígida y comienza a adquirir el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido, para convertirse finalmente en el material mecánicamente resistente que es el concreto endurecido.

#### a) Cemento

Es el componente activo del concreto e influye directamente en todas las propiedades de este material. Sin embargo el cemento constituye de un 10 a un 20% del peso del concreto. Salvo casos muy especiales, en general se usa el cemento Pórtland este es un material que proviene de la pulverización del producto obtenido por fusión incipiente de materiales arcillosos y calizos que contengan óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro en cantidades convenientemente calculadas y sin más adición posterior que yeso sin calcinar y agua, así como otros materiales que no excedan del 1% en peso del total y que no sean nocivos para el comportamiento posterior del cemento. La composición química del cemento Pórtland es muy compleja; pero puede definirse esencialmente como un compuesto de cal, alúmina y sílice. Los componentes fundamentales son:

- El aluminato tricálcico  $C_3A$
- El silicato tricálcico  $C_3S$
- El silicato dicálcico  $C_2S$
- El ferro aluminio tricálcico  $C_4FA$

#### **b) Agua**

El agua, según Porrero y otros (2004), cumple con dos (2) papeles fundamentales dentro del concreto armado, como ingrediente en la elaboración de las mezclas y como medio de curado para las estructuras recién construidas. En el primer caso es de uso interno como agua de mezclado, y en el segundo se emplea exteriormente, igual cuando el concreto se cura con agua. Aunque en estas aplicaciones las características del agua tienen efectos de diferente importancia sobre el concreto. Así, como componente del concreto convencional, el agua suele representar aproximadamente entre 10 y 25 por ciento del volumen del concreto recién mezclado, dependiendo del tamaño máximo de agregado que se utilice y del revenimiento que se requiera. Esto le concede una influencia importante a la calidad del agua de mezclado en el comportamiento y las propiedades del concreto, pues cualquier sustancia dañina que contenga, aún en proporciones reducidas, puede tener efectos adversos significativos en el concreto.

#### **c) Agregados**

Los agregados finos y gruesos ocupan comúnmente de 60% a 75% del volumen del concreto (70% a 85% en peso), e influyen notablemente en las propiedades del concreto recién mezclado y endurecido, en las proporciones de la mezcla, y en la economía. Los agregados finos comúnmente consisten en arena natural o piedra triturada siendo la mayoría de sus partículas menores que 5mm. Los agregados gruesos consisten en una grava o una combinación de grava o agregado triturado cuyas partículas sean predominantemente mayores que 5mm y generalmente entre 9.5mm y 38mm.

#### **2.2.8.3 Diseño de mezclas de concreto**

Se conoce como diseño de mezcla al procedimiento mediante el cual se calculan las cantidades que debe haber de todos y cada uno de los componentes que intervienen en la mezcla de concreto, para obtener de ese material el comportamiento deseado. Asimismo, una dosificación apropiada debe ser económica y manejable en estado fresco, así como también resistente y durable en estado endurecido. Cualquiera de las variables consideradas en el diseño pueden ser datos de entrada y las mismas deben ser comunes a cualquiera que sea el método que se emplee ya que son fundamentales. Estas constituyen la información básica a partir de la cual puede llegarse a la dosificación de la mezcla deseada y las condiciones de durabilidad requeridas. La ubicación geográfica de la obra y las condiciones ambientales (costa, zona árida) indican la eventual necesidad, o no, de establecer ciertos requerimientos para dotar el concreto de elementos de defensa y garantizar la durabilidad del mismo. Estos suelen limitar: el valor de resistencia a la compresión, la relación agua/cemento, la dosis de cemento y otros.

#### **2.2.8.4 Fraguado del concreto**

Cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla. Dentro del proceso general de endurecimiento se presenta un estado en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad y se vuelve difícil de manejar; tal estado corresponde al fraguado inicial de la mezcla. A medida que se produce el endurecimiento normal de la mezcla, se presenta un nuevo estado en el cual la

consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable; este estado se denomina fraguado final.

#### **2.2.8.5 Endurecimiento del concreto**

El endurecimiento del concreto depende a su vez del endurecimiento de la lechada o pasta formada por el cemento y el agua, entre los que se desarrolla una reacción química que produce la formación de un coloide “gel”, a medida que se hidratan los componentes del cemento. La reacción de endurecimiento es muy lenta, lo cual permite la evaporación de parte del agua necesaria para la hidratación del cemento, que se traduce en una notable disminución de la resistencia final. Es por ello que debe mantenerse húmedo el concreto recién colado, “curándolo”.

#### **2.2.8.6 Curado del concreto**

El curado es la operación mediante la cual se protege el desarrollo de las reacciones de hidratación del cemento, evitando la pérdida parcial del agua de reacción por efecto de la evaporación superficial. Esta pérdida de agua agrieta al concreto y abre la puerta a los agentes agresivos (Porrero y otros, 1996). El curado es uno de los procedimientos o prácticas constructivas, que una vez vaciado el concreto en la obra, se debe tener previsto, ya que impide el secado prematuro de la pasta de concreto, que podría generar consecuencias tales como reacciones químicas interrumpidas entre el agua y el cemento por falta del medio húmedo que proporciona el agua, además, podría afectar la durabilidad del concreto y específicamente sus características superficiales. Otra de las propiedades que se verían afectadas por una mala aplicación del curado o ausencia de éste es la permeabilidad, que puede provocar su aumento, quedando la superficie del concreto el equivalente a 50 veces más expuesta.

#### **2.2.8.7 Permeabilidad del concreto**

El concreto normal es un material permeable. Los vacíos que dejan los agregados no son llenados totalmente por la mezcla de agua y cemento y además, el agua de mezclado, la cual se utiliza en gran parte para conseguir una adecuada trabajabilidad del concreto, se evapora en los primeros meses del colado dejando huecos más o menos numerosos.

### **2.2.8.8 Acero de refuerzo**

En el concreto armado, el concreto aporta su resistencia a compresión, mientras que el acero de refuerzo es el que le aporta la ductilidad y la resistencia a la tracción.

#### **a. Características del acero**

Los aceros son aleaciones de hierro y carbono forjables, que contienen entre un 0,04 y un 2,25% de carbono lo que los distinguen de las fundiciones. Así, las propiedades físicas de los aceros y su comportamiento a distintas temperaturas dependen sobre todo de la cantidad de carbono y de su distribución en el hierro. El acero se puede clasificar de la siguiente manera:

- Aceros al carbono (contienen diferentes cantidades de carbono y menos del 1,65% de manganeso, el 0,60% de silicio y el 0,60% de cobre)
- Aceros aleados (poseen vanadio y molibdeno además de cantidades mayores de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono)
- Aceros inoxidable (llevan cromo y níquel, entre otros elementos de aleación)
- Aceros de herramientas (contienen wolframio, molibdeno y otros elementos de aleación que les proporcionan mayor resistencia, dureza y durabilidad)
- Aceros de baja aleación ultra resistentes (tienen menos cantidad de elementos de aleación y deben su elevada resistencia al tratamiento especial que reciben)

#### **b. Ventajas de la utilización del acero en la construcción**

- Existen abundantes yacimientos de minerales de hierro, suficientemente ricos, puros y fáciles de exportar.
- Existe la posibilidad de reciclar la chatarra en procesos industriales.
- La alta resistencia del acero por unidad de peso implica que será poco el peso de las estructuras.
- La durabilidad. Si el mantenimiento de las estructuras de acero es adecuado duraran indefinidamente.

- La ductilidad, propiedad que tiene el material de soportar grandes deformaciones sin fallar bajo altos esfuerzos de tensión. La naturaleza dúctil de los aceros estructurales comunes les permite fluir localmente, evitando así fallas prematuras; así como la tenacidad.
- Los procesos de producción industrializados son relativamente simples y económicos.
- Presentan una interesante combinación de propiedades mecánicas, las que pueden modificarse dentro de un amplio rango variando los componentes de aleación o aplicando tratamientos.
- Su plasticidad permite obtener piezas de formas geométricas complejas con relativa facilidad.
- La experiencia acumulada en su utilización permite realizar predicciones de su comportamiento, reduciendo costos de diseño y plazos de puesta en el mercado

**c. Desventajas de la utilización del acero en construcción**

- Los costos de mantenimiento. La mayor parte de los aceros son susceptibles a la corrosión al estar expuestos al agua y al aire y, por consiguiente, deben pintarse periódicamente.
- Los altos costo de la protección contra el fuego.
- La susceptibilidad al pandeo en elementos verticales sometidos a compresión.

El acero es un material muy utilizado en estructuras y otros componentes de la construcción. En general requiere tratamientos de protección a base de pinturas o de la galvanización con zinc. Es el material común de construcción que tiene mejores prestaciones mecánicas. Su límite elástico es muy alto, de modo que pequeñas secciones soportan esfuerzos importantes. Es el caso de las estructuras metálicas, de las mixtas de hormigón y acero, el hormigón armado, la mampostería estructural reforzada, entre otras posibilidades. La durabilidad del material del acero expuesto a la intemperie es limitada, ya que es muy sensible a los procesos de oxidación y corrosión en contacto con el agua, atmósferas húmedas o agresivas. Cuando el acero se encuentra correctamente colocado como

refuerzo de elementos de concreto, la envoltura le aporta la protección necesaria para su larga durabilidad contra la corrosión y oxidación, por impedir el contacto directo con moléculas de oxígeno, sales minerales, entre otros.

## **2.2.9 Fundamentos generales de la corrosión**

### **2.2.9.1 Corrosión**

Según González (1989), define la corrosión como “destrucción o deterioración de un material a causa de su reacción con el medio ambiente” (p. 1). Los materiales no metálicos son atacados por agentes químicos definidos bajo condiciones específicas y son resistentes a la acción de medios corrosivos suaves como lo es el agua de la atmósfera, sin embargo muchos metales son corroídos la mayoría de las veces por el agua de la atmósfera. El fenómeno de la corrosión de la materia sólida consiste básicamente en la pérdida de equilibrio en las fuerzas cohesivas. Este fenómeno afecta el material de una manera que este pierde su resistencia, ductilidad, y propiedades físicas y mecánicas.

### **2.2.9.2 Ambientes corrosivos**

Casi todos los ambientes son corrosivos en cierto grado. Algunos ejemplos son: el aire y la humedad; fresco, destilado, salino; atmósferas rurales, urbanas e industriales; vapor y otros gases tales como cloro, amoníaco, sulfuro de hidrogeno, dióxido de azufre, entre otros; ácidos minerales tales como el clorhídrico, sulfúrico y nítrico; ácidos orgánicos como acético y formico; álcalis; solventes; aceites y vegetales y del petróleo y una variedad de productos alimenticios. En general, los materiales inorgánicos son más corrosivos que los orgánicos.

A temperaturas superiores a los 200°C, existe una reactividad significativa de la mayoría de los metales en aire seco y la rapidez y magnitud de la reacción aumentan progresivamente, tanto si se incrementa la temperatura como si el aire es contaminado por otros gases. La corrosión a temperaturas elevadas es entonces, un estudio de las propiedades semiconductoras de óxidos, sulfuros, etc. y de la influencia de la temperatura, la presión y los contaminantes iónicos sobre la coherencia mecánica, estabilidad y permeabilidad de estos.

Así, en aire húmedo en el cual no está presente una masa de agua, puede formarse una capa muy delgada de agua, quizás como resultado de la hidratación

de una capa sólida de óxido, sulfuro o carbonato, formada químicamente. Al principio la condensación ocurrirá cuando la presión del agua en el ambiente exceda a la presión parcial (esto es a la actividad) del agua de cristalización en una sal, por ejemplo. Es esta delgada capa de agua la que proporciona el solvente y el electrolito conector necesario para la corrosión electroquímica. En el mecanismo básico de corrosión el metal se disuelve primero como iones y los productos sólidos tal como el moho, pueden o no formarse mediante una reacción subsiguiente. A la temperatura ambiente, el progreso de la corrosión electroquímica está determinado por un número de factores, de entre los cuales, tiene primordial importancia la naturaleza (agresividad, concentración) de cualquiera de los reactivos oxidantes que estén presentes. Pero, a diferencia de la corrosión a temperatura elevada, la rapidez de corrosión electroquímica no solo está determinada por las prioridades conductoras de las capas superficiales formadas por el proceso, sino también por factores cinéticos, tales como la difusión y las reacciones de transferencia de electrones, todos los cuales, por supuesto, ocurren más lentos a bajas temperaturas.

### **2.2.9.3 Corrosión atmosférica**

La corrosión de los metales en la atmósfera es un proceso de naturaleza electroquímica, en el que se presentan reacciones anódicas y catódicas cada vez que se forma la capa de electrolito sobre el metal. La corrosión va a depender del tiempo en donde la capa de humedad permanece sobre la superficie metálica. La meteorología de un lugar condiciona los procesos de corrosión que pueden suceder en los metales, ya que juega un papel fundamental en la formación de la película de humedad sobre la superficie e influye de manera indirecta en la composición de dicha capa. Como parte del electrolito, aparecen los contaminantes atmosféricos que pueden solubilizarse en la capa de humedad, y de esta manera participar activamente en los procesos de corrosión, la mayoría de las veces acelerando el deterioro del material. Es por ello que, la incidencia de la corrosión por la atmósfera depende, no solo del contenido de humedad sino también del contenido de polvo del aire y otras impurezas contenidas en el mismo,

de las cuales algunas favorecen la condensación de humedad sobre la superficie del metal.

· **Tipos de atmósferas**

Según Gómez y Barcenás (2006), las atmósferas varían considerablemente con respecto a la humedad, temperatura y contaminantes, por lo tanto las velocidades de corrosión atmosférica varían marcadamente por todo el mundo. Un metal resistente a una atmósfera puede carecer de resistencia en otro sitio, y por lo tanto el relativo desempeño de los metales puede cambiar con la atmósfera. A continuación se describen brevemente cada uno de los tipos de atmósferas:

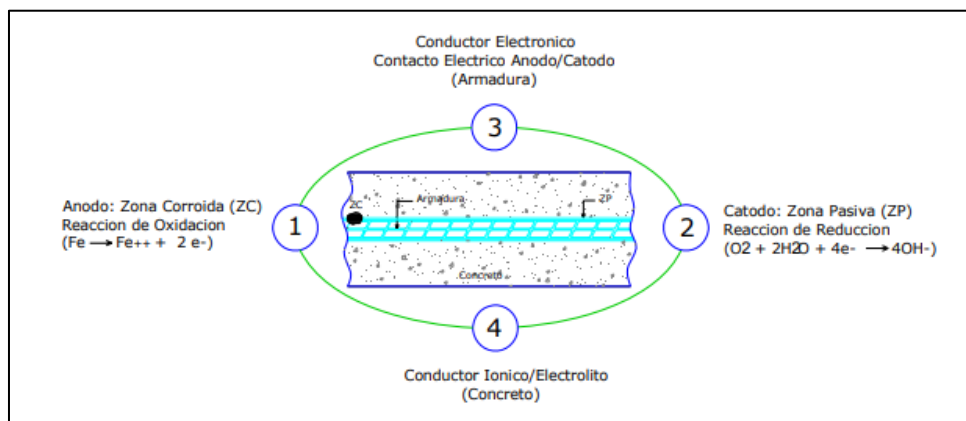
- a) **Rural:** Usualmente es una atmósfera que no contiene agentes químicos, pero contiene polvo orgánico e inorgánico. Su principal constituyente corrosivo está mezclado principalmente con elementos gaseosos tales como oxígeno y dióxido de carbono.
- b) **Tropical:** Es una variación especial de la atmósfera rural. En climas áridos, hay poca o ninguna precipitación acuosa, pero puede haber alta humedad relativa y condensación ocasional. En el trópico además de alta temperatura promedio, el ciclo diario incluye una alta humedad relativa, intensas insolaciones y largos periodos de condensación durante la noche.
- c) **Marina:** El ion cloruro es el que determina la agresividad de dicha atmósfera. El cloruro de sodio disuelto aumenta la conductividad favoreciendo así los procesos electroquímicos de corrosión. La atmósfera marina también incluye el espacio por encima del nivel del mar donde se produce el salpicado y la espuma.
- d) **Industrial y Urbano:** Los principales contaminantes a tomar en cuenta dada su elevada agresividad, son los gases  $SO_2$ ,  $H_2S$  y óxidos de nitrógenos. Como resultado de estos contaminantes, más el rocío o niebla en este tipo de atmósfera, se produce una alta corrosividad de las superficies metálicas en exposición

## 2.2.10 Corrosión en el concreto armado

### 2.2.10.1 Corrosión en armadura de concreto

La corrosión de la armadura en el concreto consiste en la oxidación destructiva del acero, por el medio que lo rodea. Así, mostrado en la figura 17, la corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica que consiste en cuatro elementos principales:

- Un ánodo, donde ocurre la oxidación.
- Un cátodo, donde ocurre la reducción.
- Un conductor metálico, donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones
- Un electrolito, en este caso el concreto, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso.



**Figura 17.** Elementos constituyentes de la celda de corrosión.

*Fuente: Manual Durar (Pag. 19)*

### 2.2.10.2 Corrosión del concreto armado como fenómeno electroquímico

Un fenómeno electroquímico es aquel donde ocurre el paso de corriente eléctrica, acompañado de alteraciones o cambios químicos. Para llevarse a cabo necesita de la existencia conjunta de un electrolito, o un conductor electrolítico; es decir un líquido o sustancia capaz de conducir corriente eléctrica de un ánodo o electrodo positivo y de un cátodo o electrodo negativo. El paso de la corriente eléctrica se debe al transporte de partículas formadas llamadas iones. Los iones cargados positivamente (cationes) se mueven hacia el cátodo y los iones cargados negativamente (aniones) se mueven hacia el ánodo. En el fenómeno de la

corrosión, el electrolito vendría a ser el medio agresivo (agua, suelo o atmósfera) el ánodo está representado por las áreas donde ocurre la corrosión y el cátodo por las áreas no corroídas de la armadura de acero.

Por lo tanto, la corrosión electroquímica del acero en el concreto, resulta por la falta de uniformidad en el acero (diferentes aceros, soldaduras, sitios activos sobre la superficie del acero), contacto con metales menos activos, así como también, de las heterogeneidades en el medio químico o físico (concreto) que rodea al acero.

En este sentido, la potencialidad para la corrosión electroquímica puede existir debido a la falta de uniformidad del acero en concreto por lo que la corrosión se previene por la formación de una película de óxido de hierro pasivante. Sin embargo, cuando las condiciones de servicio cambian y el concreto se altera o a través de él penetran sustancias agresivas, se produce el rompimiento de esta película y la corrosión de las armaduras se desencadena con una triple consecuencia:

- El acero disminuye su sección o incluso se convierte completamente en óxido.
- El concreto puede figurarse o deslaminarse debido a las presiones que ejerce el óxido expansivo al generarse
- La adherencia armadura-concreto disminuye o desaparece.

### **2.2.10.3 Agentes químicos que inducen el deterioro en el concreto**

El deterioro del concreto se le atribuye en parte a las relaciones químicas que existen, entre el cemento y los constituyentes minerales que poseen los agregados, así como también acontece por el contacto de diversos agentes químicos. En este sentido, para que la corrosión del acero pueda iniciarse y mantenerse existen dos mecanismos que en general son los más aceptados:

- Reducción de la alcalinidad por lixiviación de las sustancias alcalinas con agua o neutralización parcial con dióxido de carbono u otro material ácido
- Por la acción electroquímica que involucra al ion cloruro en presencia de oxígeno

Así, el acero se corroe por la reacción anódica que permite que él se disuelva como ion ferroso. Debe haber una reacción catódica simultánea, como la reducción de oxígeno, todo esto en presencia de agua. Sin la presencia simultánea en el concreto de oxígeno y humedad no es termodinámicamente posible la corrosión y, sin una cantidad mínima crítica, no es posible que se desarrolle con velocidad apreciable.

#### **2.2.10.4 Causas de corrosión en las armaduras**

La principal causa de corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto tiene origen en una diferencia de potencial electroquímica en la que es común la presencia de una corriente eléctrica que inicia el fenómeno de corrosión electrolítica, aunque también se reconoce que este tipo de proceso se puede manifestar por un ataque químico directo. Según Bolognini (2005), para mitigar la ocurrencia de los procesos corrosivos, se deben identificar causas que lo favorecen, como lo son las siguientes:

- Excesiva porosidad del concreto (concreto permeable al agua y al aire).
- Reducido espesor del recubrimiento de concreto sobre el refuerzo.
- Existencia de grietas en la estructura.
- Alta concentración de agentes corrosivos en los componentes del concreto.
- Manifestación de corrientes eléctricas en el concreto (corrientes parásitas o generadas internamente por diferencia de potencial).

Según Andrade (1998) son esencialmente dos las causas que pueden dar lugar a la destrucción de la capa pasivante del acero:

- La presencia de una cantidad de cloruros (tanto porque se añadan durante el amasado como porque penetren desde el exterior), u otros iones despasivantes en contacto con la armadura.
- La disminución de la alcalinidad de hormigón por reacción con sustancias ácidas de medios como suelos salinos, agua de mar, aguas industriales y atmósferas húmedas contaminadas o no por agentes agresivos.

#### **2.2.11 Clasificación de la corrosión**

Para evaluar los daños producidos por la corrosión, es conveniente clasificarlos según la forma como se producen, por lo tanto tomando en cuenta el

medio donde se desarrollan los procesos de corrosión, se puede distinguir los diversos factores que influyen en este fenómeno.

- **Por mecanismo**

- a) **Corrosión Química**

Este tipo de corrosión también se le conoce como Corrosión Seca. Bajo esta denominación se estudian aquellos casos en que el metal reacciona con un medio no-iónico (por ejemplo oxidación en aire a altas temperaturas) y la característica principal es que no hay circulación de corriente. Este tipo de corrosión ocurre en un ambiente electrolito o de gases seco que se pueden producir en altos hornos. La corrosión química involucra cambios químicos, tales como mecanismos de oxidación.

**Tipos de corrosión química**

- 1) **Corrosión por reacción de intercambio iónico:** causada por la reacción de los componentes de la pasta endurecida del cemento con las sustancias presentes en el agua agresiva formándose compuestos solubles que son arrastrados por una corriente de agua o que también pueden permanecer en el lugar de la formación sin capacidad aglomerante.
- 2) **Corrosión por lixiviación de la cal:** consiste en una reducción en el contenido del óxido de calcio (CaO) del concreto, debido a la acción de lavado que sufren ciertos compuestos de la pasta endurecida de cemento (silicatos, aluminatos, ferritos hidratados) causada al poner en contacto la superficie del concreto con aguas puras, libres de sales pocas carbonatadas, ácidas, y excesivamente blandas, debido a que dichas aguas tienen un gran poder disolvente. Como consecuencia de esta reducción de óxido de calcio (CaO), ocurre la extracción de los compuestos nombrados anteriormente, y el concreto pierde resistencia y se desmorona. Este tipo de corrosión frecuentemente se presenta en concretos porosos, ya que en ellos existe la posibilidad de circulación de agua.
- 3) **Corrosión por expansión:** se origina por el ataque de ciertas sales al concreto, ocurriendo la formación de nuevos compuestos estables dentro de la masa del cemento endurecido, dando origen a la formación de

cristales que ocupan sus poros y huecos. En un momento determinado aumenta la capacidad del concreto y este se refuerza, pero como los cristales continúan creciendo ejercen una fuerza expansiva sobre el concreto y terminan destruyéndolo. La mayor parte de los procesos de destrucción por formación de sales son ocasionados por la acción de los sulfatos.

- 4) **Corrosión interna:** se produce cuando un exceso de yeso se pone en contacto con una solución de cal. Este yeso es el que se añade al clinkler para actuar como regulador del fraguado del cemento.

#### **b) Corrosión Electroquímica**

Conocida como Corrosión Húmeda, aunque el aire atmosférico es el medio más común, las soluciones acuosas son los ambientes que con mayor frecuencia se asocian a los problemas de corrosión. En el término solución acuosa se incluyen aguas naturales, suelos, humedad atmosférica, lluvia y soluciones creadas por el hombre. Debido a la conductividad iónica de estos medios, el ataque corrosivo es generalmente electroquímico. Este tipo de corrosión involucra una corriente eléctrica como consecuencia del transporte de partículas cargadas (iones) de un lugar a otro del metal. En los procesos de corrosión electroquímica circulan, sobre el material expuesto a corrosión, corrientes eléctricas. Entre los tipos de corrosión de electroquímica, se describen las siguientes:

- 1) **Corrosión selectiva:** se presenta en aleaciones, y consiste en el ataque de un componente de dichas aleaciones. Se manifiesta con la producción de fisuras como por ejemplo la desZinc-ficación, en cuyo proceso se pierde el zinc (Zn) de una aleación cuando esta es puesta en contacto con mucho oxígeno y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en soluciones estancadas. Este efecto puede verse afectado con la temperatura.
- 2) **Corrosión por fatiga:** se presenta cuando se aplican esfuerzos de tensión o compresión, ya sean residuales o externos, sobre una pieza metálica que está expuesta a un medio corrosivo. Se presenta generalmente bajo la forma de grietas locales.

- 3) **Corrosión por grietas:** ocurre cuando en pequeñas grietas se retienen soluciones, dificultándose así el secado, o cuando hay exceso o déficit de oxígeno, como por ejemplo las grietas producidas en obras sumergidas.

- **Por forma o apariencia**

Cuando se quiere evaluar los daños producidos por la corrosión resulta muy conveniente la siguiente clasificación:

- a) **Corrosión localizada**

Este tipo de corrosión es en donde la pérdida de metal ocurre en áreas discretas o localizadas.

- 1) **Corrosión por picaduras:** las picaduras se forman por la disolución localizada de la película pasiva. Normalmente resultan del ingreso de iones de cloruro al medio, bien sea que vienen del medio externo o que fueron incorporados en la masa de concreto. De esta manera, se forma una celda de corrosión donde existe un área pasiva intacta, actuando como cátodo, en la cual se reduce el oxígeno y una pequeña área donde se ha perdido la película, actuando como ánodo, en la cual ocurre la disolución del acero.
- 2) **Corrosión en espacios confinados:** puede ocurrir cuando sobre la superficie del metal existe un espacio lo suficientemente resguardado que evita el acceso continuo del oxígeno a esa zona, pudiendo crearse celdas diferenciales de oxígeno que inducen a la corrosión del refuerzo. Existen varias situaciones que pueden inducir este daño, entre ellas se puede mencionar la inyección de grietas (estructurales o por corrosión) con material epóxico, donde ya el medio agresivo ha llegado al refuerzo, siendo esta zona donde la corrosión se aceleraría por la falta de acceso de oxígeno.
- 3) **Corrosión bajo tensión:** conocida como Corrosión Figurante, ocurre cuando se dan conjuntamente dos circunstancias: esfuerzos de tracción sobre el acero y un medio agresivo. Esto sucede normalmente cuando se utilizan aceros alta resistencia debido, en general, a la presencia de hidrogeno atómico difundiendo a través del metal. Este hidrógeno puede

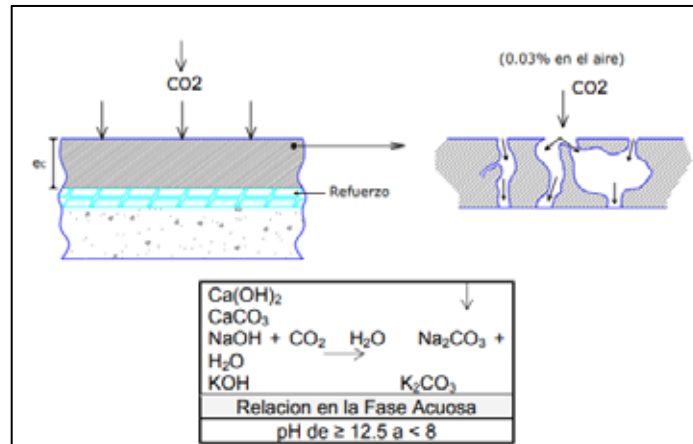
provenir de muchas fuentes: corrosión del acero, protección catódica, etc. Asimismo, la corrosión bajo tensión es un fenómeno muy específico, generalmente asociado a una mala calidad del concreto, o a la presencia de determinados iones, generalmente aportados por algunos aditivos, o al uso de un determinado tipo de acero (templado y revenido) que se ha utilizado preferentemente en Alemania

- 4) **Corrosión por corrientes de interferencia:** Las corrientes de interferencia, llamadas también vagabundas, erráticas o de fuga, pueden ser definidas como las corrientes que fluyen en una estructura y que no forman parte del circuito eléctrico o celda electroquímica específica. Para que ocurra este tipo de corrosión debe existir un intercambio de corriente entre una estructura metálica y un medio electrolítico. La corriente continua es la que tiene el efecto más pronunciado sobre la corrosión, ya que esta fluye en un solo sentido. Por el contrario, la corriente alterna, que invierte su dirección alrededor de una centena de veces por segundo, puede causar un efecto mucho menos pronunciado. Las fuentes más comunes de este tipo de corrientes son: sistemas de protección catódica operando en las cercanías de estructuras de concreto armado, especialmente en medios de muy baja resistividad. Independientemente de la fuente, las corrientes que fluyen en un medio electrolítico son manifestaciones de diferencias de voltaje. Si en el entorno de estos gradientes de voltajes, se encuentra situada una estructura de concreto reforzada con acero, puede existir un intercambio de corriente con el mismo, donde el punto de entrada de corriente actuaría como cátodo, pero la salida sería la zona anódica que podría causar la disolución del metal, corroyéndolo.

**b) Corrosión uniforme o generalizada**

La corrosión uniforme, ilustrada en la figura 18, es el resultado de una pérdida generalizada de la película pasiva, resultante de la Carbonatación del concreto y/o la presencia de excesiva cantidad de iones cloruro. También puede

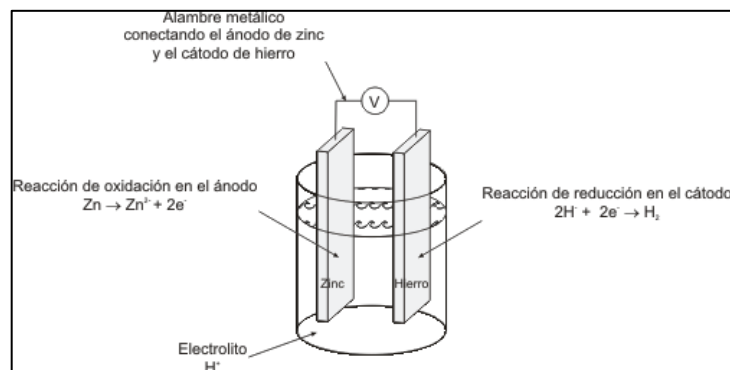
ocurrir por efecto de la lixiviación del concreto producida por la precolación y/o lavado por aguas puras o ligeramente acidas.



**Figura 18.** Mecanismo de corrosión uniforme del concreto armado  
*Fuente: Manual Durar (Pag.27)*

### a) Corrosión galvánica

Este tipo de corrosión puede ocurrir cuando existen dos metales diferentes en el medio electrolítico, como lo muestra la figura 19. En el caso del acero en concreto, esta situación ocurrirá cada vez que en alguna zona se dañe o no se forme la película pasiva característica. Esta zona actuará como un ánodo frente al resto del material, donde permanece la pasivación, el cual se comportará como cátodo. También se podría presentar cuando el refuerzo se encuentre en contacto con otros conductores más nobles.



**Figura 19.** Corrosión Galvánica

*Fuente:* [http://www.nervion.com.mx/web/conocimientos/tipos\\_corrosion.php](http://www.nervion.com.mx/web/conocimientos/tipos_corrosion.php)

### **2.2.12 Factores que Afectan y Desencadenan la Corrosión de las Armaduras**

Se denomina así a aquel conjunto de circunstancias que inducen la despasivación del acero en el concreto. La corrosión sólo se provoca si el pH baja hasta valores ácidos ( $< 8$ ), por lo que serán pues factores que afectan o desencadenan la corrosión todos aquellos que den lugar a una neutralización del medio alcalino propio del concreto o que supongan la ausencia de contacto entre el acero y el concreto.

- **Dosificación del concreto**

El concreto debe ser sólido, homogéneo, compacto, resistente y poco poroso, que garantice, además de sus significativas prestaciones mecánicas, la protección de la armadura de acero de la estructura, de las acciones agresivas de los agentes externos. La dosificación es un factor que influye de forma significativa en el comportamiento futuro del concreto, como elemento protector del acero de refuerzo.

Tomando en consideración que, el concreto debe cumplir una doble función protectora como barrera física que, se opone a la penetración de los agentes agresivos externos y creando una capa pasivante sobre el acero que lo mantiene protegido, es determinante dosificarlo por métodos que proporcionen su máxima compacidad, lo que significa garantizar su mínima porosidad. La porosidad de la masa de concreto la aporta fundamentalmente la pasta de cemento endurecida y es a través de ella que el agua ejerce su función de vector de transferencia de los elementos agresivos externos, y por esto la relación agua-cemento, el grado de hidratación y la cantidad de pasta son factores determinantes en la cantidad y tipos de poros en el concreto.

- **Compacidad y Homogeneidad**

La compacidad del concreto, es la propiedad más importante del mismo a los efectos de su resistencia a la penetración de los agentes agresivos externos. Esta expresada por la cantidad de materia sólida contenida en una unidad cúbica, o es la relación entre el volumen sólido y el volumen aparente total. Las mezclas con a/c baja ( $< 0.4$ ) son utilizadas en ambientes agresivos por la alta protección brindada a la armadura (baja porosidad y alta alcalinidad). Sin embargo, un curado deficiente de estas mezclas impide la hidratación del cemento,

principalmente en la superficie del concreto, lo cual se manifestará en un incremento de la porosidad y por lo tanto en la disminución de su resistencia a la agresividad ambiental.

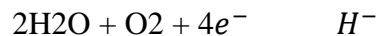
Por otra parte, la homogeneidad del concreto es la cualidad por la cual los distintos componentes del mismo aparecen igualmente distribuidos en toda su masa, de manera tal que dos muestras de distintos lugares de la estructura fabricada con el mismo concreto, resulten prácticamente iguales.

- **Espesor de recubrimiento del concreto**

La protección que confiere el concreto que recubre las barras de acero de una estructura de concreto armado dependerá del grado de impermeabilidad de éste, que a su vez estará dada por su compacidad y homogeneidad en esa zona. El espesor de la capa de concreto es importante, para garantizar la protección a la armadura, dependiendo del ambiente al cual va a estar expuesto.

- **Humedad Ambiental**

La presencia de agua es imprescindible para la corrosión en medios neutros y alcalinos, pues interviene en el proceso catódico de reducción del oxígeno:



Además el agua es necesaria para la movilidad de los iones a través del electrolito. En el concreto seco, la resistividad eléctrica es tan elevada que impide que la corrosión se produzca aun en ausencia de la capa pasivante sobre el acero; sólo la existencia de una cierta cantidad mínima de humedad en los poros del concreto permitirá el desarrollo de los procesos corrosivos. Por tanto, cuanto mayor sea el contenido de humedad en los poros del concreto, menos será el valor de la resistividad eléctrica y más elevadas podrán ser las velocidades de corrosión.

El contenido en agua de los poros es función, en situaciones de no inmersión o no saturación, de la humedad relativa (HR) del ambiente. La humedad relevante, es decir, la que influye en los procesos de corrosión, es la realmente contenida en los poros. A este respecto, debe tenerse en cuenta que la humedad ambiental y la del concreto sólo coinciden en regímenes estacionarios y que en condiciones cambiantes es mayor la humedad del concreto, porque éste pierde agua a menor velocidad de lo que gana a causa de la existencia de tensiones

capilares. Este último fenómeno puede verse acrecentado cuando el concreto esté contaminado por cloruros, a causa del carácter higroscópico de los mismos. Asimismo, aunque el ambiente exterior esté seco, el interior del concreto no se seca más que cuando tales circunstancias se prolongan largo tiempo. En la mayoría de los concretos, a partir de 3 – 4 cm. del medio exterior, los poros siempre se encuentran saturados o casi saturados de humedad.

- **Efectos de la temperatura**

La temperatura juega un doble papel en los procesos de deterioro. Por un lado, su incremento promueve la movilidad de las moléculas facilitando el transporte de sustancias; por otro, su disminución puede dar lugar a condensaciones que, a su vez, pueden producir incrementos locales importantes del contenido de humedad del material. Además, la cantidad absoluta de vapor de agua en la atmósfera varía con la temperatura. Existe un efecto opuesto entre humedad y temperatura, ya que al aumentar esta última se evapora humedad y cuando desciende, condensa agua líquida en los capilares. La humedad, el oxígeno, y la temperatura tienen efectos contrapuestos y por lo tanto no es fácil predecir la evolución del proceso de corrosión del acero a partir de uno sólo de estos factores.

- **Estado superficial del acero**

El estado superficial del acero afectará las reacciones que tendrán lugar en contacto con él. En términos generales, el acero cuya superficie posee la cubierta de óxidos provenientes del proceso de conformado se presenta menos reactivo que aquél cuya superficie está libre de dicha capa. No obstante, la presencia de productos de oxidación generados por la corrosión atmosférica no necesariamente demuestran iguales comportamientos, siendo incluso altamente probable que de estar contaminados con agentes agresivos como el ion cloruro, se propicie la corrosión.

Adicionalmente, los productos de corrosión presentes en forma masiva, no adherentes, deben ser eliminados, ya que ocasionan problemas de adherencia o condiciones propicias para la corrosión de la armadura en el concreto.

- **Tensiones mecánicas del acero**

Los aceros de pre y postensado son de composición eutectoide (alrededor del 0.8% de Carbono) y suelen estar sometidos a tensiones entre el 60 y el 80% de su límite elástico. Estas elevadas tensiones no representan ningún riesgo si el acero está exento de imperfecciones y de óxidos superficiales y si el concreto que lo rodea es de elevada calidad. En el concreto donde la carbonatación alcance los alambres tensados, o donde haya ciertos iones despasivantes (SCN-, S=, Cl-), existe el riesgo de una corrosión bajo tensión. Asimismo, no todos los concretos pre- o postensados que se deterioran lo hacen mediante este mecanismo que es relativamente inusual; la mayoría de las fallas se deben a una corrosión simple por cloruros o por carbonatación.

- **Corrientes erráticas o de interferencia**

Son aquellas que por diversas causas abandonan sus circuitos naturales para circular por el medio en el que se encuentran los conductores, siguiendo así caminos no previstos. En el caso de estructuras de concreto armado este efecto es importante para acelerar un proceso de corrosión ya iniciado por otros factores, como por ejemplo, concretos ya contaminados por iones cloruros o carbonatados.

- **Contacto galvánico entre dos metales**

El contacto de las armaduras con otros metales no suele ocasionar su corrosión en ausencia de agentes desencadenantes. Sin embargo, deberá evitarse este contacto, pues podrían existir determinadas circunstancias que sitúen al acero en condiciones más favorables para la despasivación, si los otros metales lo polarizaran hacia potenciales más anódicos.

- **Concentración de Agentes Agresivos. Iones Despasivantes**

De los iones despasivantes, son los cloruros los que más afectan directamente la pasivación del refuerzo. Los iones sulfato intervienen en la degradación del concreto que permiten que la armadura se exponga al medio, produciéndose su corrosión. Estos iones son los siguientes:

- a) **Cloruros**

Provocan una disolución localizada de la capa pasiva, dando lugar a ataques puntuales (picaduras) que pueden reducir drásticamente la sección de trabajo del acero, en espacios de tiempo relativamente cortos. Los cloruros se encuentran en

la masa del concreto por dos causas: a) porque los contengan las materias primas (aditivos, agua, cemento o áridos), o b) porque penetren desde el exterior al estar situada la estructura en ambientes marinos o estar sometida a la acción de sales de deshielo.

En el caso de los cloruros que pudieran ser adicionados durante el amasado del concreto, los códigos de fabricación y de cálculos de estructuras de concreto de todos los países limitan su contenido en proporciones variables. Las divergencias en las cantidades máximas de cloruros admitidas por los distintos códigos aparecen debido a la inexistencia de un límite único de aplicación general. Ello se produce tanto por las diferencias de características de los cementos (su contenido en álcalis y velocidad de hidratación), como por los distintos tipos de acero utilizados (composición química, rugosidad superficial y estado de conservación), así como por las distintas materias potencialmente suministradoras de cloruros. Tres son los aspectos relevantes a tener en cuenta en el caso de los cloruros que penetran desde el exterior:

- El tiempo que tardan en llegar hasta la armadura
- La proporción que induce la despasivación
- La velocidad de corrosión que provocan una vez desencadenada la corrosión.

#### **b) Sulfatos**

El ión sulfato ( $SO_4^{-2}$ ) forma sales. Estos sulfatos, perjudiciales para el concreto, se encuentran preferentemente en los terrenos arcillosos o en sus capas freáticas. De estas sales las más importantes son las siguientes: los sulfatos más peligrosos para el cemento Pórtland son los amoníacos, cálcico, magnésicos y sódico; los sulfatos potásico, cúprico y alumínico son menos peligrosos, mientras que los sulfatos bóricos y el de plomo son insolubles y, por lo tanto, inofensivos para el concreto.

La presencia de sulfatos en un agua que está en contacto con una pasta endurecida de cemento, puede incrementar considerablemente la solubilidad de los componentes de dicha pasta y causar, por una parte, el desarrollo de la degradación del concreto por lixiviación. De otro lado, la presencia de sulfatos

puede ocasionar una reacción de cambio de base, en el curso de la cual el catión del sulfato será sustituido por  $\text{Ca}^{+2}$ , originándose la degradación del concreto por reacción de cambio iónico. En ciertas circunstancias puede ocurrir, sin embargo, que la presencia de sulfatos dé lugar a una degradación por expansión debido a la formación de otros componentes estables en la masa endurecida del cemento.

### **c) Carbonatación**

La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral. El concreto, con su ambiente altamente alcalino (rango de pH de 12 a 13), protege al acero de refuerzo ahogado contra la corrosión. Esta protección se logra por la formación de una capa de óxido pasivo sobre la superficie del acero que permanece estable en el ambiente altamente alcalino. Esta es la misma capa pasivadora que atacan los cloruros cuando alcanzan el acero de refuerzo expuesto a sales descongelandes y ambientes marinos.

Cuando progresa la carbonatación hacia la profundidad del refuerzo, la capa de óxido protectora y pasivadora deja de ser estable. A este nivel de pH (por debajo de 9.5), es posible que empiece la corrosión, resultando finalmente en el agrietamiento y astillamiento del concreto. Aunque la difusión del dióxido de carbono a través de los poros de concreto pueda requerir años antes de que ocurra el daño por corrosión, puede ser devastadora y muy costosa de reparar.

### **Factores que afectan la carbonatación**

#### **1) Contenido de humedad del concreto**

Para que tenga lugar la carbonatación, debe haber presencia de humedad. La reacción de carbonatación avanza más rápidamente cuando la humedad relativa en el concreto se encuentra entre 50 y 55%. A humedad más baja, no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelvan cantidades significativas de hidróxido de calcio. Por encima de 75% de humedad, la situación se revierte y los poros se bloquean progresivamente con agua.

Aunque esto permite que se disuelva libremente el hidróxido de calcio, evita en gran medida el ingreso del dióxido de carbono. Así se explica por qué

diferentes lados de la fachada de un edificio de concreto, por ejemplo, pueden variar grandemente en la profundidad de sus frentes de carbonatación. Una fachada expuesta al mar puede tener poca carbonatación debido a su contenido constantemente alto de humedad, mientras que la carbonatación puede haber avanzado a niveles más profundos en los otros lados del edificio.

## **2) Permeabilidad del concreto**

El concreto permeable se carbonatará rápidamente. Muchos años de protección contra la carbonatación pueden sumarse al concreto reforzado si los constructores simplemente siguen las prácticas estándar para producir concreto de baja permeabilidad. Éstas incluyen relaciones bajas de agua/cemento, compactación apropiada por vibración, uso de puzolanas tales como ceniza volante o humo de sílice y curado apropiado. Todas estas prácticas reducen la permeabilidad del concreto y hacen más difícil para que el dióxido de carbono se difunda a través de él.

## **3) Recubrimiento del concreto y defectos de superficie**

La carbonatación puede inclusive causar problemas de corrosión aun en concreto de alta calidad. Un recubrimiento bajo del concreto y defectos de superficie tales como grietas y pequeños hoyos proporcionan una ruta directa al acero de refuerzo. No pasará mucho tiempo antes de que el acero en el área de esta grieta empiece a corroerse debido a la pérdida de pasivación.

Los bordes del recubrimiento de concreto son notables por su susceptibilidad a la corrosión inducida por carbonatación. Si el acero en estas áreas no tuviera un recubrimiento de concreto adecuado, la carbonatación conduciría a la corrosión y podría causar astillamiento en los bordes en muy pocos años. Durante la construcción original, las esquinas son también áreas donde con frecuencia el concreto no está bien compactado. Los huecos y los agregados expuestos de la superficie reducen el recubrimiento de concreto, permitiendo que la carbonatación alcance rápidamente el acero.

### **· Lixiviación por Aguas Blandas**

La degradación del concreto no sólo puede ser causada por agua que contenga sustancias agresivas, sino también por aguas totalmente puras, libres de

sales, por aguas blandas que tengan pocas impurezas o por aguas de condensación industrial, aguas de fusión de glaciares, aguas de nieve, aguas de lluvia, aguas pantanosas blandas y algunas aguas procedente de grandes profundidades. El concreto es rápidamente atacado por las aguas blandas agresivas, las cuales tienden a disolver el calcio de la estructura. La lixiviación del hidróxido cálcico del concreto o la reducción del contenido de CaO, conduce a la destrucción de los restantes componentes del concreto, silicatos, aluminatos y ferritos hidratados; como consecuencia, el concreto pierde su resistencia y se desmorona.

- **Existencia de fisuras**

Las fisuras estructurales (transversal es a la armadura) pueden constituir en principio un camino rápido de llegada de los agresivos hasta la misma, dependiendo de su abertura. Las fisuras del concreto, originadas por solicitaciones mecánicas sobre la estructura, se disponen, en general, en planos ortogonales a las armaduras principales, puesto que éstas se colocan precisamente para absorber las tensiones de tracción que el concreto por sí solo no puede soportar. Sin embargo, limitar la deformación en tracción del acero para que no supere la de rotura en tracción del concreto y así evitar las fisuras transversales, supone un desperdicio económicamente inaceptable de la capacidad de las armaduras.

Las fisuras que acompañan las armaduras en su misma dirección son, en general, resultantes de un proceso de corrosión ya iniciado. La incidencia de la abertura de la fisura en la corrosión de las armaduras depende de factores como:

- Agresividad del medio ambiente.
- Recubrimiento de la armadura.
- Calidad del concreto.

En cuanto a las fisuras longitudinales debidas a asentamientos tradicionales del concreto o a retracción plástica, se considera que se comportarán, en cuanto a la durabilidad, de forma más agresiva que las transversales, dado que el área de armadura expuesta al ataque es mayor en las fisuras longitudinales.

### **2.3 Definición de términos básicos**

**Agua Blanda:** Es la que contiene una concentración relativamente baja de carbonato de calcio y otros iones.

**Ánodo:** Electrodo positivo de una celda electrolítica al cual se dirigen los aniones de la disolución.

**Cátodo:** Electrodo negativo de una celda electrolítica al cual se dirigen los cationes de la disolución.

**Celda de corrosión:** Es una celda o pila galvánica en la cual las reacciones electroquímicas que tienen lugar conducen a la corrosión.

**Fisura:** Abertura alargada y con muy poca separación entre sus bordes, que se hace en un cuerpo sólido, especialmente un hueso o un mineral.

**Flujo:** Movimiento de un fluido.

**Fraguado:** es el proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad del hormigón (o mortero de cemento), producido por la desecación y recristalización de los hidróxidos metálicos procedentes de la reacción química del agua de amasado con los óxidos metálicos presentes en el clinker que compone el cemento.

**Humedad:** Cantidad de agua, vapor de agua o cualquier otro líquido que está presente en la superficie o el interior de un cuerpo o en el aire.

**Permeabilidad:** Es la capacidad que tiene un material de permitirle a un fluido que lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable o no permeable si la cantidad de fluido es despreciable.

**Redes Neuronales Artificiales:** Son un modelo computacional vagamente inspirado en el comportamiento observado en su homólogo biológico

**Simulación:** Es el artificio contextual que referencia la investigación de una hipótesis o un conjunto de hipótesis de trabajo utilizando modelos un método perfecto para la enseñanza y aprendizaje.

**Tensión:** Acción de fuerzas opuestas a que está sometido un cuerpo.

**Topología:** Es la rama de las matemáticas dedicada al estudio de aquellas propiedades de los cuerpos geométricos que permanecen inalteradas por transformaciones continuas.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 Tipo de investigación**

El presente trabajo se basara en una investigación documental, se establece que:

Es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas. Como en toda investigación, el propósito de este diseño es el aporte de nuevos conocimientos. (Arias, 2012, p. 27)

Dicha investigación se realizara la recolección de datos con respecto al fenómeno a estudiar y su efecto en las estructuras, efectuando las observaciones y análisis de datos arrojado por las redes neuronales se podrá llegar a un modelo de predicción de corrosión en las estructuras de estudio.

#### **3.2 Nivel de la investigación**

El siguiente trabajo de investigación tiene como objetivo predecir la corrosión en las estructuras ubicadas en la costa de los estados Carabobo y Falcón mediante la implementación de las redes neuronales artificiales. Se establece que:

La investigación descriptiva consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Los resultados de este tipo de investigación se ubican en un nivel intermedio en cuanto a la profundidad de los conocimientos se refiere. (Arias, 2012, p.23)

Por eso es que la metodología empleada en esta investigación se llevó a cabo bajo un esquema descriptivo, ya que el estudio permitirá estudiar los efectos en las estructuras ocasionados por el fenómeno de la corrosión y así generar las correlaciones por medio de las redes neuronales y a su vez adquirir resultados comparables con las correlaciones de otras fuentes de trabajo.

#### **3.3 Diseño de la investigación**

En lo que respecta al diseño experimental, se establece que:

El diseño experimental es aquel según el cual el investigador manipula una variable experimental no comprobada, bajo condiciones estrictamente controladas. Su objetivo es describir de qué modo y porque causa se produce o puede producirse un fenómeno. Busca predecir el futuro, elaborar pronósticos que una vez confirmados, se convierten en leyes y generalizaciones tendentes a incrementar el cúmulo de conocimientos pedagógicos y el mejoramiento de la acción educativa. (Palella y Martins, 2010, p.86)

El diseño empleado en este trabajo de investigación, para cumplir con los objetivos planteados se lleva a cabo mediante un esquema metodológico experimental. Se manipulan diversas variables o información obtenida por diferentes fuentes para crear una base de data eficaz para la generación de correlaciones mediante el uso de redes neuronales artificiales.

### **3.4 Población y Muestra**

Según Balestrini (2006), define que la población “un conjunto finito o infinito de personas, casos o elementos, que presentan características comunes” (p.137). Así mismo Balestrini (2006) señala que " una muestra es una parte representativa de una población, cuyas características deben producirse en ella, lo más exactamente posible” (p. 141). Por lo que para este trabajo de investigación tanto la población y la muestra constaran de lo mismo, las estructuras ubicadas a lo largo de las costas de Carabobo y Falcón.

### **3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Según Tamayo y Tamayo, M (1997): “La recolección de datos depende en gran parte del tipo de investigación y del problema planteado para la misma” (p.121). Así mismo Tamayo y Tamayo (1997) define que: “Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información” (p. 69).

Las fuentes secundarias son aquellas investigaciones realizadas con anterioridad y que han sido recolectadas y analizadas con el propósito de sustentar las bases teóricas y la, ejecución de la investigación. Según Sabino (2004): los datos secundarios “Son registros escritos que proceden también de un contacto con la práctica, pero que ya han sido recogidos y muchas veces procesados por otros investigadores” (p. 115). En el presente trabajo de investigación se utilizará

la técnica de revisión bibliográfica, recursos electrónicos, para la recolección de datos. Dentro de este análisis bibliográfico, se utilizaron técnicas como lo es la observación documental, presentación resumida, resumen analítico y análisis crítico. Mientras que el instrumento que se utilizará será la computadora para la obtención, registración y almacenamiento de la data.

### **3.6 Fases de la investigación**

#### **Fase I: Establecer una relación entre la agresividad del medio ambiente y las estructuras civiles.**

En esta fase se establecerá una relación entre las estructuras civiles ubicadas en las costas de los estados Carabobo y Falcón, y los agentes externos a la cuales están expuestos. Mediante el uso de los antecedentes seleccionados y el material bibliográfico técnico sobre la corrosión, se identificarán las variables que permiten la aparición del fenómeno en dichas estructuras.

#### **Fase II: Diseñar las arquitecturas neuronales empleadas para la modelización de las variables de control.**

En esta fase se define la arquitectura final que tendrá la red neuronal, llevando a cabo un análisis de sensibilidad con respecto a los diferentes conjuntos de datos y a la cantidad de neuronas correspondiente en cada capa oculta, fijando la función de entrenamiento, transferencia, número de capas ocultas y *goal* previamente seleccionado en la fase anterior.

#### **Fase III: Generar correlaciones con redes neuronales artificiales para predecir la corrosividad.**

En esta fase, una vez realizada la revisión bibliográfica y la creación de la arquitectura de las redes, se procedió a realizar la simulación utilizando la herramienta computacional para la generación de correlaciones.

#### **Fase IV: Establecer una comparación entre las correlaciones matemáticas ya existentes y el valor predicho por medio de la herramienta computacional.**

En esta fase se realiza la comparación de las correlaciones arrojadas por la red neuronal y las correlaciones ya existentes arrojadas por un método estadístico convencional.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **4.1 Establecer una relación entre la agresividad del medio ambiente y las estructuras civiles.**

Para las estructuras civiles de buena calidad permanecen pasivas durante un largo intervalo de tiempo de servicio, sin embargo todo esto puede cambiar debido a la agresividad del medio ambiente. En este caso, por la zona escogida, está presente una mezcla de atmósferas rurales, tropicales, marina e industriales. En estos ambientes, los cloruros están presentes tanto en la propia agua del mar, como en la humedad de la atmósfera. Estos cloruros van penetrando a través de los poros y fisuras de la estructura, y cuando estos alcanzan la armadura en cantidad suficiente, ocasionan la rotura local de la capa pasivante del acero.

Por otra parte, el anhídrido carbónico de la atmósfera, y en general todas las sustancias ácidas, reaccionan con las sustancias alcalinas de las estructuras dando paso al decremento de pH hasta llegar a valores que provocan la desaparición inmediata de la capa pasivante, y por consiguiente la gran amenaza de una posible corrosión en el acero. La velocidad del anhídrido carbónico al ingresar a la parte interna de las estructuras, depende de diversos factores, como de la porosidad y el espesor del recubrimiento determinando la vida útil de la estructura, proceso al cual se le denomina como carbonatación.

La presencia de agua es imprescindible para la corrosión, es necesaria para la movilidad de los iones a través del electrolito. En una estructura seca, la resistividad eléctrica es tan elevada que evita la presencia de corrosión aun en ausencia de la capa pasivante. La existencia de cierta cantidad mínima de humedad en los poros, daría paso al fenómeno de la corrosión. Es decir que por más saturados en humedad estén los poros, menor será la resistividad y mayor el índice de velocidad de corrosión. El contenido en agua de los poros es función de la humedad relativa (HR). La humedad contenida en los poros es la que influye en el fenómeno, teniendo esto en cuenta, la humedad ambiental y la humedad en la

estructura solo coinciden en regímenes estacionarios y que en condiciones cambiantes es mayor la humedad en la estructura, ya que esta pierde agua a menos velocidad de lo que la gana gracias a las tensiones capilares. Este último fenómeno se ve incrementado cuando la estructura está contaminada por cloruros. De tal manera, aun estando el ambiente exterior seco, el interior de dicha más que cuando tales circunstancias se prolongan grandes intervalos.

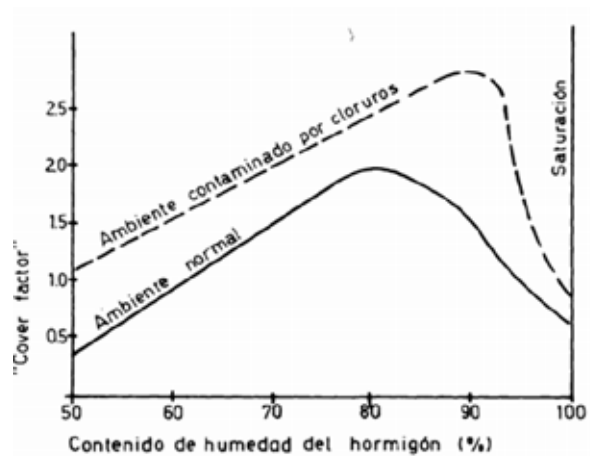
En las Figuras 20 y 21, se muestran diferentes interpretaciones de la influencia que la humedad contenida en los poros puede causar en los procesos de corrosión de estructuras. En la Figura 21, se muestra en abscisas la HR y en las ordenadas la escala de agresividad de tal manera que se vea directamente proporcional al espesor del recubrimiento en cm.

Humedad relativa efectiva.	Proceso				
	Carbonatación	Corrosión de las armaduras en el hormigón causada por: Carbonatación. Contaminación por cloruros	Aloque por heladas	Ataque químico	
Muy baja (<45%)	1	0	0	0	0
Baja (45 - 65%)	3	1	1	0	0
Media (65- 85%)	2	3	3	0	0
Alta (85-95%)	1	2	3	2	1
Saturación(>95%)	0	1	1	3	3

0 = no significativo. 1 = Bajo. 2 = Medio. 3 = Alto.

**Figura 20.** Influencia del contenido de humedad del hormigón sobre algunos procesos de deterioro.

*Fuente: Ventura y Ortega (1987)*

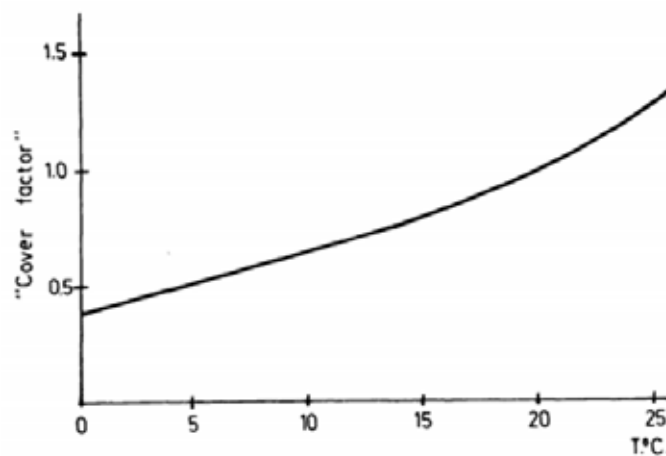


**Figura 21.** Influencia de la humedad relativa efectiva sobre el riesgo de corrosión de las armaduras.

*Fuente: Ventura y Ortega (1987)*

La temperatura, por un lado, su incremento promueve la movilidad de las moléculas facilitando el transporte de sustancias; por otro, su disminución da lugar a la condensación que puede producir incrementos locales importantes del contenido de humedad del material. Además, la cantidad absoluta de vapor de agua en la atmósfera depende de la temperatura.

En la figura, podemos observar que al pasar una temperatura media anual de 5°C a otra de 20°C, hay que doblar aproximadamente el espesor del recubrimiento para que el riesgo de la corrosión se mantenga constante. De igual manera, se puede ver que en climas más cálidos resultan ser más agresivos, y que entre los 20°C y 40°C se producen aumentos bruscos de la velocidad de corrosión.



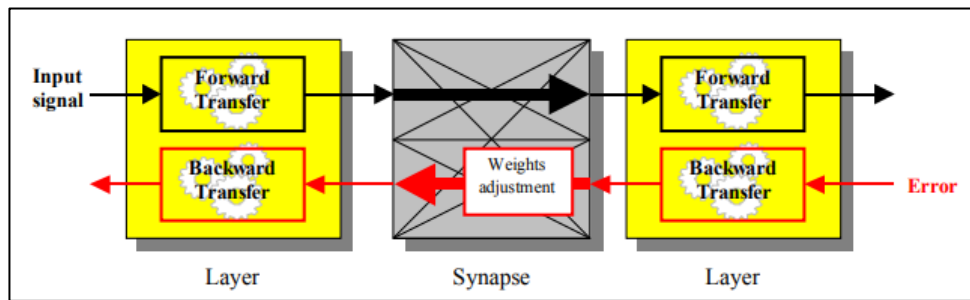
**Figura 22.** Influencia de la temperatura sobre el riesgo de corrosión de las armaduras.

*Fuente: Ventura y Ortega (1987)*

#### **4.2 Diseñar las arquitecturas neuronales empleadas para la modelización de las variables de control.**

No existe regla general para la selección de arquitectura o topología de la red más adecuada. Por lo tanto resulta más conveniente trabajar con redes neuronales con backpropagation y aprendizaje supervisado. La red comúnmente utilizada es la Perceptrón multicapa con algoritmo de backpropagation, es una red versátil con capacidad aceptables para diversas aplicaciones.

Para la creación o diseño de la red neuronal se utilizó *Joone Core Engine*, teniendo la posibilidad de crear cualquier tipo de arquitectura de red neuronal mediante el uso de un método de transferencia de patrones a través de la red sin la necesidad de un punto central de control. Para esto, cada capa es implementada como un objeto *Runnable*, de manera que cada capa corre independientemente de otras capas. Este mecanismo de transporte es usado para traer el error desde la capa de salida hacia la capa de entrada durante las fases de entrenamiento, permitiendo los pesos y bias cambiar de acuerdo al algoritmo de aprendizaje. Para lograr esto, cada capa tiene dos mecanismos de transporte opuestos, una de la salida a la entrada para transferir el patrón de entrada durante la fase de devolución, y otra de salida a entrada para transferir el error durante la fase de entrenamiento, como lo muestra la Figura 23.

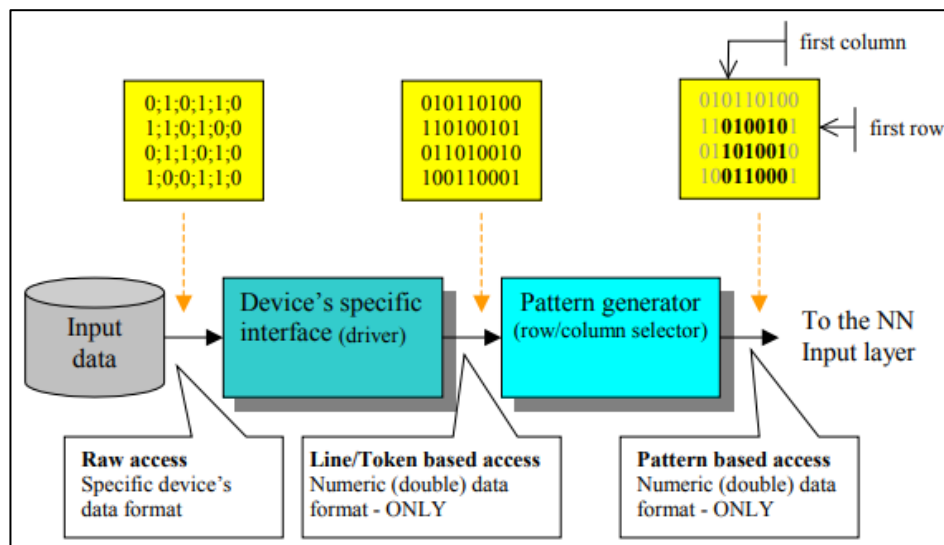


**Figura 23.** Esquema del mecanismo de transporte dentro de la red.

*Fuente: Marrone (2007)*

En la Figura 25 se muestra el esquema de la red neuronal de estilo Perceptrón multicapa que se diseñó para aplicación, el cual consta de:

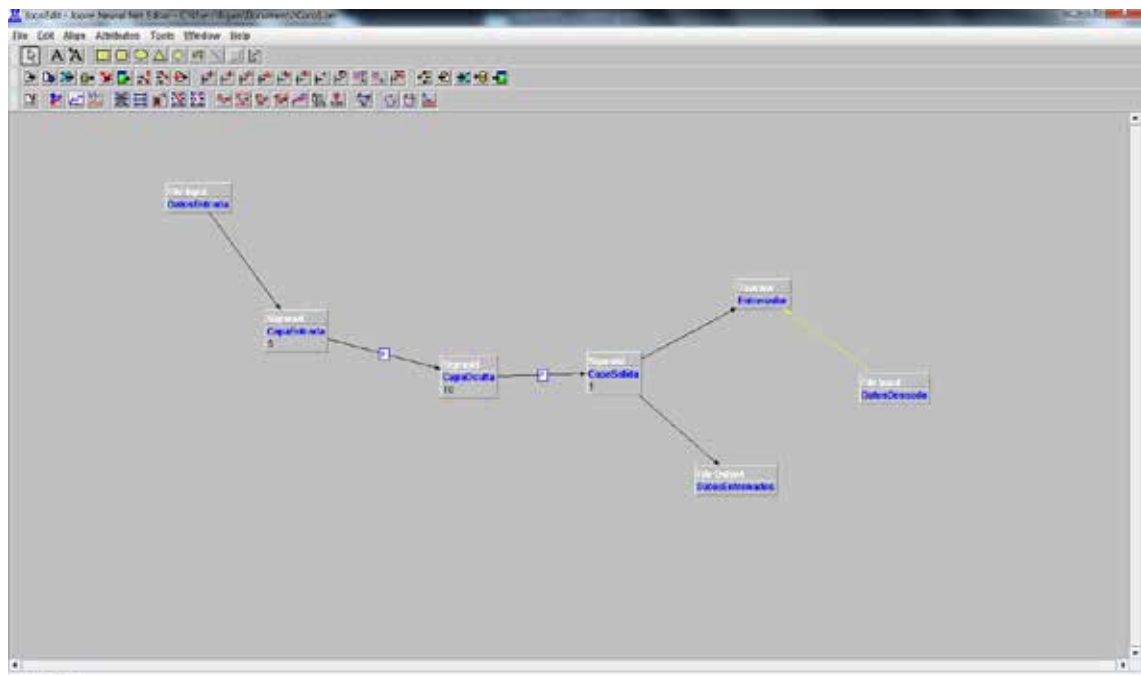
- Mecanismo de ingreso:** la red neuronal lee y elabora secuencialmente todas las filas o columnas de ingreso y por cada una genera un patrón de salida representando el resultado del proceso entero. Siendo este un mecanismo flexible debido a dos principales características: convertidor de formato, el cual permite el uso de cualquier formato de información de una fuente cualquiera, y el mecanismo de selección, para la selección de las filas y columnas deseadas. Mecanismo de ingreso ilustrado en la Figura 24.



**Figura 24.** Sistema de ingreso de datos de la red en Joone.

*Fuente: Marrone (2007)*

- **Capas:** en cuanto a las capas en la red trabajada, consta de 3 capas: Capa entrada, la cual consta de 5 neuronas debido a las 5 variables con la cual se trabajó. Una capa oculta con 10 neuronas para el procesamiento de la información. Por último, una capa de salida con 1 neurona, la cual arroja el resultado. Cabe destacar que todas estas capas fueron capas sigmoideas, para la aplicación de la función transferencia sigmoidea para los patrones de entrada. Se escogió esta función para tener valores más aproximados a la curva de corrosión, ya que es un buen representante para elementos no lineales.
- **Entrenador:** la función de este componente es calcular la diferencia entre la salida de la red y el valor deseado obtenido por una fuente de información externa. La diferencia calculada es inyectada de regreso a la red empezando desde la capa de salida, para que cada componente pueda procesar el patrón de error para modificar las conexiones internas aplicando el algoritmo de aprendizaje, tal como lo ilustra la Figura 25.
- **La salida:** los componentes de salida permiten que la red neuronal, escriba patrones de salida a un archivo cualquiera. Escriben todos los valores de los patrones, arrojando salidas ya entrenadas.



**Figura 25.** Esquema de la red neuronal estilo Perceptrón.  
*Fuente: D’Santiago (2019)*

### 4.3 Generar correlaciones con redes neuronales artificiales para predecir la corrosividad.

#### 4.3.1 Recopilación de datos

En esta sección se analiza el comportamiento promedio de los parámetros de entrada que fueron utilizados para la construcción de la red neuronal. Cabe destacar, que las variables de entrada utilizadas para el entrenamiento y prueba de la red fueron la temperatura, la humedad relativa, el tiempo de humectación, la velocidad del dióxido de azufre y la velocidad de los electrolitos de cloro. Dichos datos utilizados para el desarrollo de la red provienen del autor Pérez, L. (2017), en su trabajo de investigación titulado **“Caracterización de la corrosividad atmosférica provocada por agentes agroquímicos y factores meteorológicos que afectan los equipos y materiales en CVG EDELCA subestación la arenosa a 765 kV”**. De esta información junto a otra recopilada de diversas páginas meteorológicas se logró originar una base de datos de características promedias en las zonas de estudio como lo muestra las Tablas 1-3:

Coro:

Mes	Temp(°C)	HR (%)	TDH (h/a)	S02 ( $\frac{mg}{m^2 d}$ )	CL ( $\frac{mg}{m^2 d}$ )
Enero	27,45	69	0,04965753	0	45
Febrero	27,75	68,5	0,01426941	1,432	28
Marzo	28,25	67	0,00753425	1,432	28
Abril	28,75	69	0,01038813	1,432	28
Mayo	29,55	68,5	0,02773973	0,502	11
Junio	29,75	68	0,04794521	0,502	11
Julio	29,5	67,5	0,05479452	0,502	11
Agosto	29,95	67	0,05753425	1,281	17
Septiembre	30,1	67	0,05445205	1,281	17
Octubre	29,4	70,5	0,06324201	4,928	32
Noviembre	28,6	72	0,05981735	0,235	51
Diciembre	27,65	71	0,0533105	0,458	52

**Tabla 1.** Datos recopilados para la ciudad de Coro

*Fuente: D'Santiago (2019)*

Puerto Cabello:

Mes	Temp(°C)	HR (%)	TDH (h/a)	S02 ( $\frac{mg}{m^2 d}$ )	CL ( $\frac{mg}{m^2 d}$ )
Enero	26	81	0,04965753	0	42
Febrero	25,5	82	0,01426940	2,136	22
Marzo	26,5	83,5	0,00753424	2,136	22
Abril	26,5	84	0,01038812	2,136	22
Mayo	27	84,5	0,02773972	0,417	8
Junio	27	83,7	0,04794520	0,417	8
Julio	27,5	83	0,05479452	0,417	8
Agosto	27	82,5	0,05753424	0,67	14
Septiembre	28	82	0,05445205	0,67	14
Octubre	28	82,2	0,06324200	2,681	24
Noviembre	27	82,4	0,05981735	1,721	46
Diciembre	26,5	82,2	0,05331050	0,191	47

**Tabla 2.** Datos recopilados para la ciudad de Puerto Cabello.

*Fuente: D'Santiago (2019)*

Punto Fijo:

Mes	Temp (°C)	HR (%)	TDH (h/a)	S02 ( $\frac{mg}{m^2 d}$ )	CL ( $\frac{mg}{m^2 d}$ )
Enero	29	75	0,04965753	0	42
Febrero	31	72	0,01426940	1,432	22
Marzo	33	71	0,00753424	1,432	22
Abril	26	76	0,01038812	1,432	22
Mayo	30	77	0,02773972	0,502	8
Junio	34	76	0,04794520	0,502	8
Julio	32	74	0,05479452	0,502	8
Agosto	32	76	0,05753424	1,281	14
Septiembre	31	77	0,05445205	1,281	14
Octubre	33	78	0,06324200	4,928	24
Noviembre	30	78	0,05981735	0,235	46
Diciembre	30	77,5	0,05331050	0,458	47

**Tabla 3.** Datos recopilados para la ciudad de Punto Fijo.

*Fuente: D'Santiago (2019)*

#### 4.3.2 Preparación de los datos:

Posterior a la selección de los datos a utilizar, se procedió a utilizar modelos matemáticos que han sido desarrollado a lo largo de los años para asesorar la corrosión atmosférica en las estructuras, dando como resultante una aproximación de dicho fenómeno. Debido a la metodología de dos programas internacionales enfocadas en el estudio atmosférico. ISO CORRAG, programa diseñado con el propósito de estandarizar ensayos de corrosión atmosférica, culpable de la creación de 4 normas internacionales: ISO 9223, ISO 9224, ISO 9225 e ISO 9226. MICAT, programa encargado de la creación de un mapa Ibero Americano de corrosión atmosférica. Unidos en colaboración con un tercer programa, realizado un estudio extensivo sobre la corrosión atmosférica involucrando un total de 38 países, gracias a los resultados obtenidos, pudieron llegar a diversos modelos matemáticos pertinentes a atmosferas marinas, siendo estos los siguientes:

$$C = 0.69 Cl + 0.30 SO_2 \quad \text{Ec.5}$$

$$C = 0.62 Cl + 0.22 SO_2 + 0.15 TDH \quad \text{Ec.6}$$

$$C = 0.57 Cl + 0.31 SO_2 + 0.31 TDH \quad \text{Ec.7}$$

Existen diferentes métodos para la selección de la variable independiente, las cuales un modelo de regresión debe incluir. El modelo más ampliamente aceptado es la regresión paso a paso (*stepwise*). Para saber la cualidad más adecuada en relación a la data experimental, la estadística  $R^2$  es utilizada. Esta expresa la proporción de varianza de la variable dependiente que es explicado por las variables independientes. La información mostrada para atmósferas marinas por los programas ISO CORRAG y MICAT, muestran efectos importantes por parte del TDH, Cl y  $SO_2$  en la magnitud de la corrosión atmosférica sobre las estructuras. Siendo los coeficientes de correlación,  $R^2$ , de 0.538, 0.474 y 0.582 para las ecuaciones 5, 6 y 7 respectivamente.

#### 4.3.3 Aplicación de los modelos matemáticos:

Para los cálculos de la corrosión atmosférica en las diferentes zonas de estudio, se aplicaron las ecuaciones 5,6 y 7, en ese mismo orden, junto a los datos recopilados, generando así una resultante de corrosión promedio en estas zonas. Siendo la ecuación 5, el modelo matemático desarrollado por el programa de MICAT; la ecuación 6, el modelo generado por la colaboración de ambos programas, ISO CORRAG y MICAT; y por último, la ecuación 7, la regresión lineal generada por el programa ISO CORRAG. Dando como resultado a la información representada en las Tablas 4-12.

Coro:

Mes	Corrosión( $\mu\text{m}$ )	Suma( $\mu\text{m}$ )
Enero	31,05	31,05
Febrero	19,7496	50,7996
Marzo	19,7496	70,5492
Abril	19,7496	90,2988
Mayo	7,7406	98,0394

Junio	7,7406	105,78
Julio	7,7406	113,5206
Agosto	12,1143	125,6349
Septiembre	12,1143	137,7492
Octubre	23,5584	161,3076
Noviembre	35,2605	196,5681
Diciembre	36,0174	232,5855

**Tabla 4.** Modelo MICAT aplicado en Coro.  
Fuente: D'Santiago (2019)

Mes	Corrosión( $\mu\text{m}$ )	Suma( $\mu\text{m}$ )
Enero	27,90744863	27,90744863
Febrero	17,67718041	45,58462904
Marzo	17,67617014	63,26079918
Abril	17,67659822	80,9373974
Mayo	6,93460096	87,87199836
Junio	6,937631782	94,80963014
Julio	6,938659178	101,7482893
Agosto	10,83045014	112,5787395
Septiembre	10,82998781	123,4087273
Octubre	20,9336463	144,3423736
Noviembre	31,6806726	176,0230462
Diciembre	32,34875658	208,3718027

**Tabla 5.** Modelo MICAT + ISO CORRAG aplicado en Coro.  
Fuente: D'Santiago (2019)

Mes	Corrosión( $\mu\text{m}$ )	Suma( $\mu\text{m}$ )
Enero	25,66539383	25,66539383
Febrero	16,40834352	42,07373735
Marzo	16,40625562	58,47999297
Abril	16,40714032	74,88713329
Mayo	6,434219316	81,32135261

Junio	6,440483015	87,76183562
Julio	6,442606301	94,20444192
Agosto	10,10494562	104,3093875
Septiembre	10,10399014	114,4133777
Octubre	19,78728502	134,2006627
Noviembre	29,16139338	163,3620561
Diciembre	29,79850626	193,1605623

**Tabla 6.** Modelo ISO CORRAG aplicado en Coro.  
Fuente: D'Santiago (2019)

Puerto Cabello:

Mes	Corrosión( $\mu\text{m}$ )	Suma( $\mu\text{m}$ )
Enero	28,98	28,98
Febrero	15,8208	44,8008
Marzo	15,8208	60,6216
Abril	15,8208	76,4424
Mayo	5,6451	82,0875
Junio	5,6451	87,7326
Julio	5,6451	93,3777
Agosto	9,861	103,2387
Septiembre	9,861	113,0997
Octubre	17,3643	130,464
Noviembre	32,2563	162,7203
Diciembre	32,4873	195,2076

**Tabla 7.** Modelo MICAT aplicado en Puerto Cabello.  
Fuente: D'Santiago (2019)

Mes	Corrosión( $\mu\text{m}$ )	Suma( $\mu\text{m}$ )
Enero	26,04744863	26,04744863
Febrero	14,11206041	40,15950904
Marzo	14,11105014	54,27055918
Abril	14,11147822	68,3820374

Mayo	5,055900959	73,43793836
Junio	5,058931781	78,49687014
Julio	5,059959178	83,55682932
Agosto	8,836030137	92,39285945
Septiembre	8,835567808	101,2284273
Octubre	15,4793063	116,7077336
Noviembre	28,9075926	145,6153262
Diciembre	29,19001658	174,8053427

**Tabla 8.** Modelo MICAT + ISO CORRAG aplicado en Puerto Cabello.  
Fuente: D'Santiago (2019)

Mes	Corrosión( $\mu\text{m}$ )	Suma( $\mu\text{m}$ )
Enero	23,95539384	23,95539384
Febrero	13,20658352	37,16197735
Marzo	13,20449562	50,36647297
Abril	13,20538032	63,57185329
Mayo	4,697869315	68,2697226
Junio	4,704133014	72,97385562
Julio	4,706256301	77,68011192
Agosto	8,205535616	85,88564753
Septiembre	8,204580137	94,09022767
Octubre	14,53071502	108,6209427
Noviembre	26,77205338	135,3929961
Diciembre	26,86573626	162,2587323

**Tabla 9.** Modelo ISO CORRAG aplicado en Puerto Cabello.  
Fuente: D'Santiago (2019)

Punto Fijo:

Mes	Corrosión( $\mu\text{m}$ )	Suma( $\mu\text{m}$ )
Enero	28,98	28,98
Febrero	15,6096	44,5896
Marzo	15,6096	60,1992

Abril	15,6096	75,8088
Mayo	5,6706	81,4794
Junio	5,6706	87,15
Julio	5,6706	92,8206
Agosto	10,0443	102,8649
Septiembre	10,0443	112,9092
Octubre	18,0384	130,9476
Noviembre	31,8105	162,7581
Diciembre	32,5674	195,3255

**Tabla 10.** Modelo MICAT aplicado en Punto Fijo.  
Fuente: D'Santiago (2019)

Mes	Corrosión( $\mu\text{m}$ )	Suma( $\mu\text{m}$ )
Enero	26,04744863	26,04744863
Febrero	13,95718041	40,00462904
Marzo	13,95617014	53,96079918
Abril	13,95659822	67,9173974
Mayo	5,074600959	72,99199836
Junio	5,077631781	78,06963014
Julio	5,078659178	83,14828932
Agosto	8,970450137	92,11873945
Septiembre	8,969987808	101,0887273
Octubre	15,9736463	117,0623736
Noviembre	28,5806726	145,6430462
Diciembre	29,24875658	174,8918027

**Tabla 11.** Modelo MICAT + ISO CORRAG aplicado en Punto Fijo.  
Fuente: D'Santiago (2019)

Mes	Corrosión( $\mu\text{m}$ )	Suma( $\mu\text{m}$ )
Enero	23,95539384	23,95539384
Febrero	12,98834352	36,94373735
Marzo	12,98625562	49,92999297

Abril	12,98714032	62,91713329
Mayo	4,724219315	67,6413526
Junio	4,730483014	72,37183562
Julio	4,732606301	77,10444192
Agosto	8,394945616	85,49938753
Septiembre	8,393990137	93,89337767
Octubre	15,22728502	109,1206627
Noviembre	26,31139338	135,4320561
Diciembre	26,94850626	162,3805623

**Tabla 12.** Modelo ISO CORRAG aplicado en Punto Fijo.  
Fuente: D'Santiago (2019)

#### 4.3.4 Normalización de los datos

Posteriormente, se realizó el procesamiento de los datos con el fin de dos propósitos, debido a que la red *feed-foward backpropagation* junto a las capas con función de transferencia *tansig* (sigmoide) restringen los valores de salida entre 0 y 1 como lo muestran las Tablas 13-21, y con el fin de tener de entrada y la salida de la red en un mismo rango de magnitud, ya que estos valores se encuentran en escalas totalmente diferentes. Por lo que se quiso contar con una distribución uniforme de datos para procesos que impliquen reconocimiento de patrones y facilitación del aprendizaje. De no ser normalizado los datos de entradas dentro del rango aceptable, la red no haría predicciones precisas y resulta ser menos preciso. Para la realización de dicho normalizado:

$$D_s = \frac{D_i}{MD} \quad \text{Ec.8}$$

Donde:  $D_s$  es el dato normalizado,  $D_i$  el dato de la variable de entrada y  $MD$  el máximo valor de la variable de entrada.

Coro:

Mes	Temp (°C)	HR (%)	TDH (h/a)	S02 $(\frac{mg}{m^2 d})$	CL $(\frac{mg}{m^2 d})$	Corrosi ón(µm)	Suma (µm)
Ene	0,91196	0,95833	0,78520	0,00000	0,86538	0,86208	0,13350

Feb	0,92193	0,95139	0,22563	0,29058	0,53846	0,54833	0,21841
Mar	0,93854	0,93056	0,11913	0,29058	0,53846	0,54833	0,30333
Abr	0,95515	0,95833	0,16426	0,29058	0,53846	0,54833	0,38824
May	0,98173	0,95139	0,43863	0,10187	0,21154	0,21491	0,42152
Jun	0,98837	0,94444	0,75812	0,10187	0,21154	0,21491	0,45480
Jul	0,98007	0,93750	0,86643	0,10187	0,21154	0,21491	0,48808
Ago	0,99502	0,93056	0,90975	0,25994	0,32692	0,33635	0,54017
Sept	1	0,93056	0,86101	0,25994	0,32692	0,33635	0,59225
Oct	0,97674	0,97917	1	1	0,61538	0,65408	0,69354
Nov	0,95017	1	0,94585	0,04769	0,98077	0,97899	0,84514
Dic	0,91860	0,98611	0,84296	0,09294	1	1	1

**Tabla 13.** Normalización del modelo MICAT en Coro.

*Fuente: D'Santiago (2019)*

Mes	Temp (°C)	HR (%)	TDH (h/a)	S02 ( $\frac{mg}{m^2 d}$ )	CL ( $\frac{mg}{m^2 d}$ )	Corrosión ( $\mu m$ )	Suma ( $\mu m$ )
Ene	0,91196	0,95833	0,78520	0,00000	0,86538	0,86271	0,13393
Feb	0,92193	0,95139	0,22563	0,29058	0,53846	0,54646	0,21877
Mar	0,93854	0,93056	0,11913	0,29058	0,53846	0,54643	0,30360
Abr	0,95515	0,95833	0,16426	0,29058	0,53846	0,54644	0,38843
May	0,98173	0,95139	0,43863	0,10187	0,21154	0,21437	0,42171
Jun	0,98837	0,94444	0,75812	0,10187	0,21154	0,21446	0,45500
Jul	0,98007	0,93750	0,86643	0,10187	0,21154	0,21450	0,48830
Ago	0,99502	0,93056	0,90975	0,25994	0,32692	0,33480	0,54028
Sept	1	0,93056	0,86101	0,25994	0,32692	0,33479	0,59225
Oct	0,97674	0,97917	1	1	0,61538	0,64712	0,69272
Nov	0,95017	1	0,94585	0,04769	0,98077	0,97935	0,84475
Dic	0,91860	0,98611	0,84296	0,09294	1	1	1

**Tabla 14.** Normalización del modelo MICAT + ISO CORRAG en Coro.

*Fuente: D'Santiago (2019)*

Mes	Temp °C	HR (%)	TDH (h/a)	S02 ( $\frac{mg}{m^2 d}$ )	CL ( $\frac{mg}{m^2 d}$ )	Corrosión ( $\mu m$ )	Suma ( $\mu m$ )
Ene	0,91196	0,95833	0,78520	0,00000	0,86538	0,86130	0,13287
Feb	0,92193	0,95139	0,22563	0,29058	0,53846	0,55064	0,21782
Mar	0,93854	0,93056	0,11913	0,29058	0,53846	0,55057	0,30275
Abr	0,95515	0,95833	0,16426	0,29058	0,53846	0,55060	0,38769
May	0,98173	0,95139	0,43863	0,10187	0,21154	0,21592	0,42100

Jun	0,98837	0,94444	0,75812	0,10187	0,21154	0,21613	0,45435
Jul	0,98007	0,93750	0,86643	0,10187	0,21154	0,21621	0,48770
Ago	0,99502	0,93056	0,90975	0,25994	0,32692	0,33911	0,54001
Sept	1	0,93056	0,86101	0,25994	0,32692	0,33908	0,59232
Oct	0,97674	0,97917	1	1	0,61538	0,66404	0,69476
Nov	0,95017	1	0,94585	0,04769	0,98077	0,97862	0,84573
Dic	0,91860	0,98611	0,84296	0,09294	1	1	1

**Tabla 15.** Normalización del modelo ISO CORRAG en Coro.

*Fuente: D'Santiago (2019)*

Puerto Cabello:

Mes	Temp (°C)	HR (%)	TDH (h/a)	S02 $\left(\frac{mg}{m^2 d}\right)$	CL $\left(\frac{mg}{m^2 d}\right)$	Corrosión ( $\mu m$ )	Suma ( $\mu m$ )
Ene	0,92857	0,95858	0,78520	0,00000	0,89362	0,89204	0,14846
Feb	0,91071	0,97041	0,22563	0,79672	0,46809	0,48698	0,22950
Mar	0,94643	0,98817	0,11913	0,79672	0,46809	0,48698	0,31055
Abr	0,94643	0,99408	0,16426	0,79672	0,46809	0,48698	0,39160
May	0,96429	1,00000	0,43863	0,15554	0,17021	0,17376	0,42051
Jun	0,96429	0,99053	0,75812	0,15554	0,17021	0,17376	0,44943
Jul	0,98214	0,98225	0,86643	0,15554	0,17021	0,17376	0,47835
Ago	0,96429	0,97633	0,90975	0,24991	0,29787	0,30353	0,52887
Sept	1	0,97041	0,86101	0,24991	0,29787	0,30353	0,57938
Oct	1	0,97278	1	1	0,51064	0,53450	0,66833
Nov	0,96429	0,97515	0,94585	0,64192	0,97872	0,99289	0,83358
Dic	0,94643	0,97278	0,84296	0,07124	1	1	1

**Tabla 16.** Normalización del modelo MICAT en Puerto Cabello.

*Fuente: D'Santiago (2019)*

Mes	Temp (°C)	HR (%)	TDH (h/a)	S02 $\left(\frac{mg}{m^2 d}\right)$	CL $\left(\frac{mg}{m^2 d}\right)$	Corrosión ( $\mu m$ )	Suma ( $\mu m$ )
Ene	0,92857	0,95858	0,78520	0,00000	0,89362	0,89234	0,14901
Feb	0,91071	0,97041	0,22563	0,79672	0,46809	0,48346	0,22974
Mar	0,94643	0,98817	0,11913	0,79672	0,46809	0,48342	0,31046
Abr	0,94643	0,99408	0,16426	0,79672	0,46809	0,48344	0,39119
May	0,96429	1	0,43863	0,15554	0,17021	0,17321	0,42011
Jun	0,96429	0,99053	0,75812	0,15554	0,17021	0,17331	0,44905
Jul	0,98214	0,98225	0,86643	0,15554	0,17021	0,17335	0,47800
Ago	0,96429	0,97633	0,90975	0,24991	0,29787	0,30271	0,52855
Sept	1	0,97041	0,86101	0,24991	0,29787	0,30269	0,57909
Oct	1	0,97278	1	1	0,51064	0,53029	0,66764
Nov	0,96429	0,97515	0,94585	0,64192	0,97872	0,99032	0,83301

Dic	0,94643	0,97278	0,84296	0,07124	1	1	1
-----	---------	---------	---------	---------	---	---	---

**Tabla 17.** Normalización del modelo MICAT + ISO CORRAG en Puerto Cabello.

*Fuente: D'Santiago (2019)*

Mes	Temp (°C)	HR (%)	TDH (h/a)	S02 ( $\frac{mg}{m^2 d}$ )	CL ( $\frac{mg}{m^2 d}$ )	Corrosión(μm)	Suma (μm)
Ene	0,92857	0,95858	0,78520	0,00000	0,89362	0,89167	0,14764
Feb	0,91071	0,97041	0,22563	0,79672	0,46809	0,49158	0,22903
Mar	0,94643	0,98817	0,11913	0,79672	0,46809	0,49150	0,31041
Abr	0,94643	0,99408	0,16426	0,79672	0,46809	0,49153	0,39179
May	0,96429	1	0,43863	0,15554	0,17021	0,17486	0,42075
Jun	0,96429	0,99053	0,75812	0,15554	0,17021	0,17510	0,44974
Jul	0,98214	0,98225	0,86643	0,15554	0,17021	0,17518	0,47874
Ago	0,96429	0,97633	0,90975	0,24991	0,29787	0,30543	0,52931
Sept	1	0,97041	0,86101	0,24991	0,29787	0,30539	0,57988
Oct	1	0,97278	1	1	0,51064	0,54086	0,66943
Nov	0,96429	0,97515	0,94585	0,64192	0,97872	0,99651	0,83443
Dic	0,94643	0,97278	0,84296	0,07124	1	1	1

**Tabla 18.** Normalización del modelo ISO CORRAG en Puerto Cabello.

*Fuente: D'Santiago (2019)*

Punto Fijo:

Mes	Temp (°C)	HR (%)	TDH (h/a)	S02 ( $\frac{mg}{m^2 d}$ )	CL ( $\frac{mg}{m^2 d}$ )	Corrosión(μm)	Suma (μm)
Ene	0,85294	0,96154	0,78520	0,00000	0,89362	0,88985	0,14837
Feb	0,91176	0,92308	0,22563	0,29058	0,46809	0,47930	0,22828
Mar	0,97059	0,91026	0,11913	0,29058	0,46809	0,47930	0,30820
Abr	0,76471	0,97436	0,16426	0,29058	0,46809	0,47930	0,38812
May	0,88235	0,98718	0,43863	0,10187	0,17021	0,17412	0,41715
Jun	1	0,97436	0,75812	0,10187	0,17021	0,17412	0,44618
Jul	0,94118	0,94872	0,86643	0,10187	0,17021	0,17412	0,47521
Ago	0,94118	0,97436	0,90975	0,25994	0,29787	0,30842	0,52663
Sept	0,91176	0,98718	0,86101	0,25994	0,29787	0,30842	0,57806
Oct	0,97059	1	1	1	0,51064	0,55388	0,67041
Nov	0,88235	1	0,94585	0,04769	0,97872	0,97676	0,83327
Dic	0,88235	0,99359	0,84296	0,09294	1	1	1

**Tabla 19.** Normalización del modelo MICAT en Punto Fijo.

*Fuente: D'Santiago (2019)*

Mes	Temp (°C)	HR (%)	TDH (h/a)	S02 ( $\frac{mg}{m^2 d}$ )	CL ( $\frac{mg}{m^2 d}$ )	Corrosión(μm)	Suma (μm)
-----	-----------	--------	-----------	----------------------------	---------------------------	---------------	-----------

Ene	0,85294	0,96154	0,78520	0,00000	0,89362	0,89055	0,14893
Feb	0,91176	0,92308	0,22563	0,29058	0,46809	0,47719	0,22874
Mar	0,97059	0,91026	0,11913	0,29058	0,46809	0,47715	0,30854
Abr	0,76471	0,97436	0,16426	0,29058	0,46809	0,47717	0,38834
May	0,88235	0,98718	0,43863	0,10187	0,17021	0,17350	0,41736
Jun	1	0,97436	0,75812	0,10187	0,17021	0,17360	0,44639
Jul	0,94118	0,94872	0,86643	0,10187	0,17021	0,17364	0,47543
Ago	0,94118	0,97436	0,90975	0,25994	0,29787	0,30670	0,52672
Sept	0,91176	0,98718	0,86101	0,25994	0,29787	0,30668	0,57801
Oct	0,97059	1	1	1	0,51064	0,54613	0,66934
Nov	0,88235	1	0,94585	0,04769	0,97872	0,97716	0,83276
Dic	0,88235	0,99359	0,84296	0,09294	1	1	1

**Tabla 20.** Normalización del modelo MICAT + ISO CORRAG en Punto Fijo.  
Fuente: D'Santiago (2019)

Mes	Temp (°C)	HR (%)	TDH (h/a)	S02 ( $\frac{mg}{m^2 d}$ )	CL ( $\frac{mg}{m^2 d}$ )	Corrosión ( $\mu m$ )	Suma ( $\mu m$ )
Ene	0,85294	0,96154	0,78520	0,00000	0,89362	0,88893	0,14753
Feb	0,91176	0,92308	0,22563	0,29058	0,46809	0,48197	0,22751
Mar	0,97059	0,91026	0,11913	0,29058	0,46809	0,48189	0,30749
Abr	0,76471	0,97436	0,16426	0,29058	0,46809	0,48192	0,38747
May	0,88235	0,98718	0,43863	0,10187	0,17021	0,17531	0,41656
Jun	1	0,97436	0,75812	0,10187	0,17021	0,17554	0,44569
Jul	0,94118	0,94872	0,86643	0,10187	0,17021	0,17562	0,47484
Ago	0,94118	0,97436	0,90975	0,25994	0,29787	0,31152	0,52654
Sept	0,91176	0,98718	0,86101	0,25994	0,29787	0,31148	0,57823
Oct	0,97059	1	1	1	0,51064	0,56505	0,67201
Nov	0,88235	1	0,94585	0,04769	0,97872	0,97636	0,83404
Dic	0,88235	0,99359	0,84296	0,09294	1	1	1

**Tabla 21.** Normalización del modelo ISO CORRAG en Punto Fijo.  
Fuente: D'Santiago (2019)

#### 4.3.5 Datos Entrenados

En las Tablas 22-30, podemos observar los resultados arrojado por la red neuronal luego de haberse entrenado por 20.000 épocas. Podemos apreciar en como los valores entrenados tienen un comportamiento de oscilación, comienzan con valores elevados que proceden a disminuir unos meses para posteriormente empezar a ascender, intentando llegar al valor inicial.

Coro:

Mes	RNA
Ene	0,667994021
Feb	0,411499101
Mar	0,315210011
Abr	0,297738333
May	0,325121496
Jun	0,467703209
Jul	0,51623852
Ago	0,556850004
Sept	0,534908464
Oct	0,67981521
Nov	0,647858291
Dic	0,649217102

**Tabla 22.** Datos Entrenados modelo MICAT en Coro.  
*Fuente: D'Santiago (2019)*

Mes	RNA
Ene	0,67833505
Feb	0,39414672
Mar	0,32171562
Abr	0,30844655
May	0,33115483
Jun	0,45289305
Jul	0,50510619
Ago	0,55358063
Sept	0,5291385
Oct	0,69263578
Nov	0,65827965
Dic	0,65860408

**Tabla 23.** Datos Entrenados modelo MICAT + ISO CORRAG en Coro.  
*Fuente: D'Santiago (2019)*

Mes	RNA
-----	-----

Ene	0,66808778
Feb	0,41083398
Mar	0,31476494
Abr	0,29740671
May	0,32416907
Jun	0,46701599
Jul	0,51581517
Ago	0,55679371
Sept	0,53472398
Oct	0,68087138
Nov	0,64810961
Dic	0,64945338

**Tabla 24.** Datos Entrenados modelo ISO CORRAG en Coro.  
*Fuente: D'Santiago (2019)*

Puerto Cabello:

Mes	RNA
Ene	0,67092397
Feb	0,41576031
Mar	0,33624899
Abr	0,32015371
May	0,32582077
Jun	0,44967167
Jul	0,49976734
Ago	0,53276514
Sept	0,51377872
Oct	0,66473739
Nov	0,67879418
Dic	0,63248702

**Tabla 25.** Datos Entrenados modelo MICAT en Puerto Cabello.  
*Fuente: D'Santiago (2019)*

Mes	RNA
Ene	0,63775248
Feb	0,35314265
Mar	0,29332947
Abr	0,2909148
May	0,39466574
Jun	0,46893403
Jul	0,48415833
Ago	0,54773133

Sept	0,5359277
Oct	0,66569019
Nov	0,74565594
Dic	0,60535464

**Tabla 26.** Datos Entrenados modelo MICAT + ISO CORRAG en Puerto Cabello.  
*Fuente: D'Santiago (2019)*

Mes	RNA
Ene	0,63817888
Feb	0,3563003
Mar	0,29307899
Abr	0,28997996
May	0,39231173
Jun	0,47057851
Jul	0,48683269
Ago	0,54824143
Sept	0,53623419
Oct	0,66660008
Nov	0,74393512
Dic	0,60530636

**Tabla 27.** Datos Entrenados modelo ISO CORRAG en Puerto Cabello.  
*Fuente: D'Santiago (2019)*

Punto Fijo:

Mes	RNA
Ene	0,66829734
Feb	0,40037752
Mar	0,30600619
Abr	0,31214026
May	0,3307163
Jun	0,45703066
Jul	0,5040976
Ago	0,54924237
Sept	0,52957556
Oct	0,66263552
Nov	0,64691995
Dic	0,64949664

**Tabla 28.** Datos Entrenados modelo MICAT en Punto Fijo.  
*Fuente: D'Santiago (2019)*

Mes	RNA
Ene	0,66830806
Feb	0,40096805
Mar	0,30687639
Abr	0,31167761
May	0,33133674
Jun	0,4577475
Jul	0,50421214
Ago	0,54898595
Sept	0,52938678
Oct	0,6617546
Nov	0,64675716
Dic	0,6492936

**Tabla 29.** Datos Entrenados modelo MICAT + ISO CORRAG en Punto Fijo.  
*Fuente: D'Santiago (2019)*

Mes	RNA
Ene	0,667897692
Feb	0,395141996
Mar	0,303601095
Abr	0,31144363
May	0,327050746
Jun	0,455265086
Jul	0,505134177
Ago	0,553513185
Sept	0,532559111
Oct	0,661318614
Nov	0,647832628
Dic	0,651793079

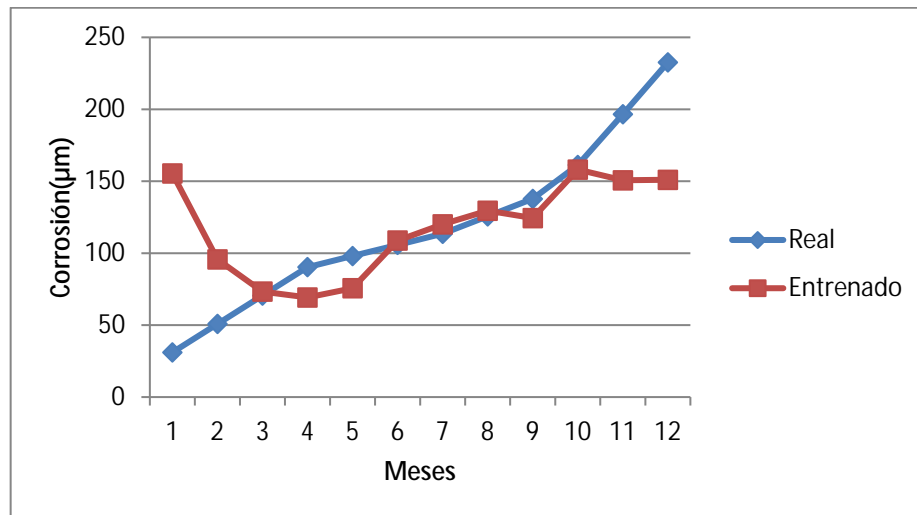
**Tabla 30.** Datos Entrenados modelo ISO CORRAG en Punto Fijo.  
*Fuente: D'Santiago (2019)*

#### **4.4 Establecer una comparación entre las correlaciones matemáticas ya existentes y el valor predicho por medio de la herramienta computacional.**

Existen investigaciones previas acerca de la corrosión atmosférica en estructuras civiles, las cuales han generado información suficiente para la creación de modelos de regresión matemática como se menciona previamente en las ecuaciones 5-7. Tomando los valores entrenados por la RNA y haciendo los pasos inversos a la normalización, se pudo generar correlaciones de lo que sería la

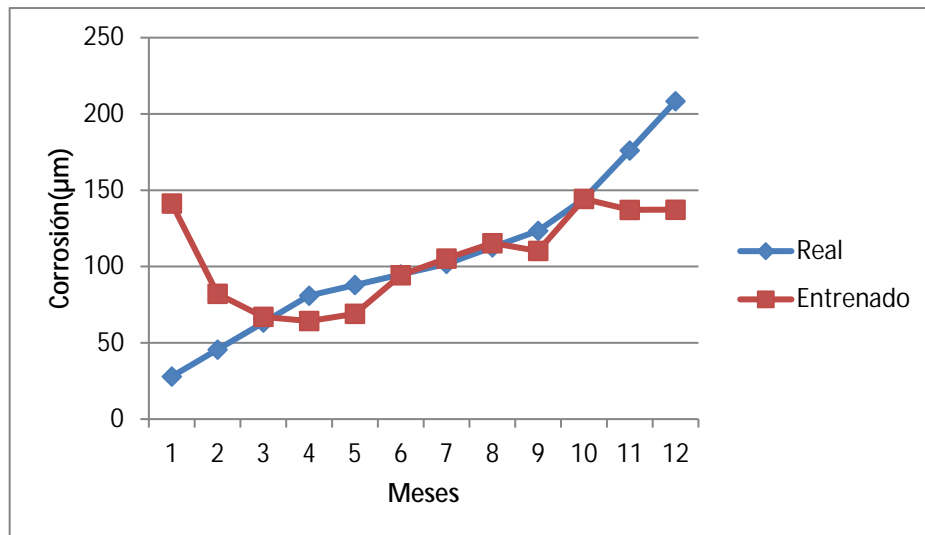
corrosión anual en las estructuras. Utilizando los valores reales y entrenados de corrosión, se realizó una serie de gráficas para visualizar mejor dichos comportamientos, dando como resultados lo siguiente:

Coro:



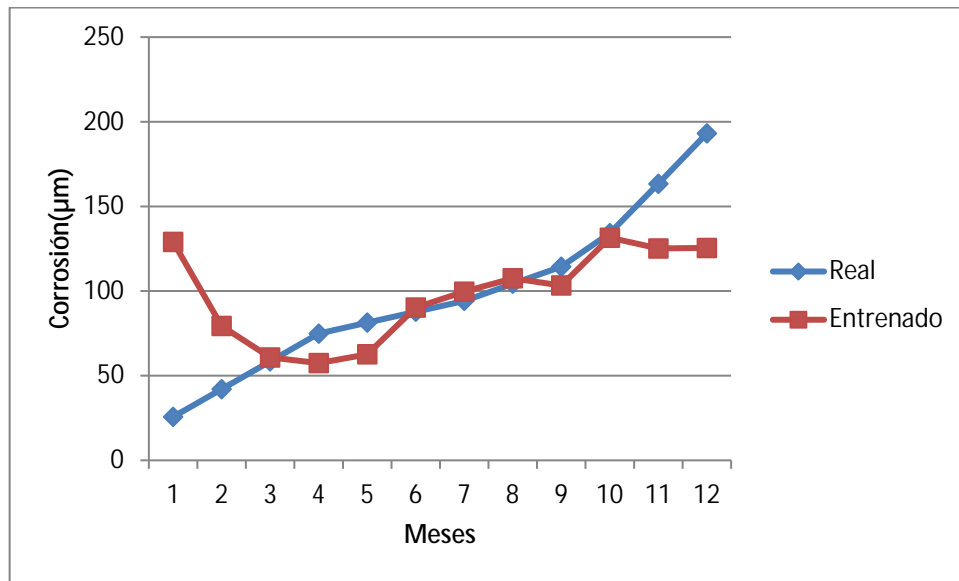
**Figura 26.** Grafica de correlaciones reales y entrenadas para el modelo MICAT en Coro.

*Fuente: D'Santiago (2019)*



**Figura 27.** Grafica de correlaciones reales y entrenadas para el modelo MICAT + ISO CORRAG en Coro.

*Fuente: D'Santiago (2019)*

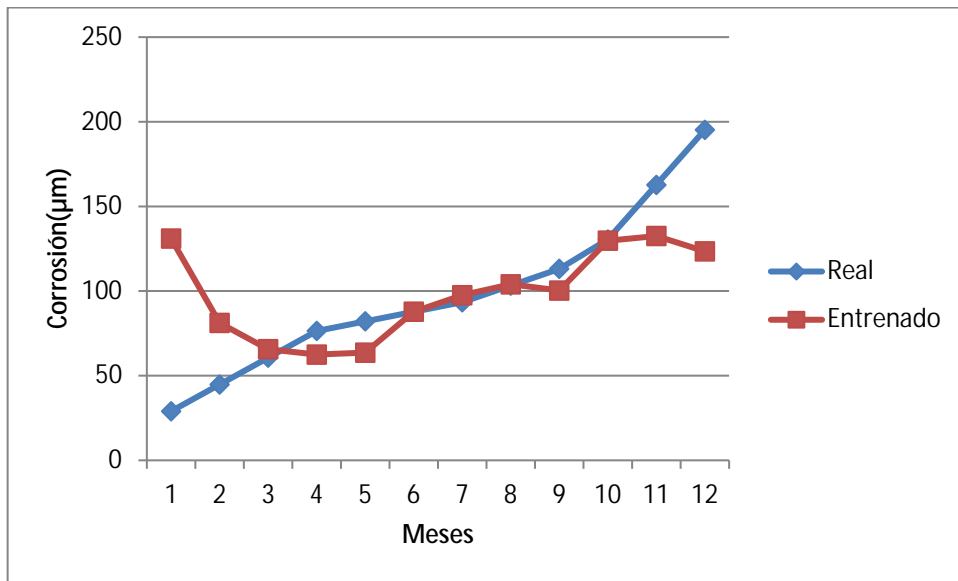


**Figura 28.** Grafica de correlaciones reales y entrenadas para el modelo ISO CORRAG en Coro.

*Fuente: D'Santiago (2019)*

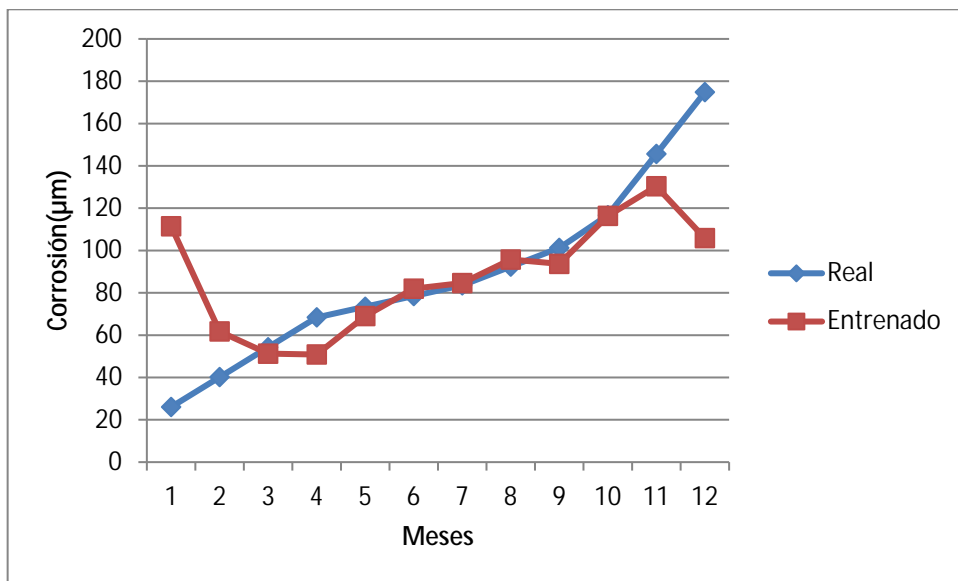
Se pudo observar en las gráficas previas, que los datos entrenados por la red neuronal diseñada, tienen el mismo comportamiento. Durante los primeros dos meses, existe una gran variación entre los datos reales y los entrenados, se observa en la Figura 28, que el valor inicial arrojado por la RNA está por encima de los 150 µm (siendo este el valor más grande del conjunto de graficas) mientras que el valor inicial de la curva real está por debajo de los 50 µm. Luego, la curva entrenada adopta un comportamiento similar a la real, aproximándose entre sus puntos o en algunos casos, coincidiendo. Finalizando de tal manera que la curva entrenada intenta adoptar el mismo comportamiento inicial, variando notoriamente de la curva real. Teniendo esta un error medio cuadrático (RMSE) de 0.1453, un porcentaje de error bastante aceptable. Las gráficas en las Figuras 27 y 28, tienen un RMSE de 0.1444 y 0.1454 respectivamente.

Puerto Cabello:



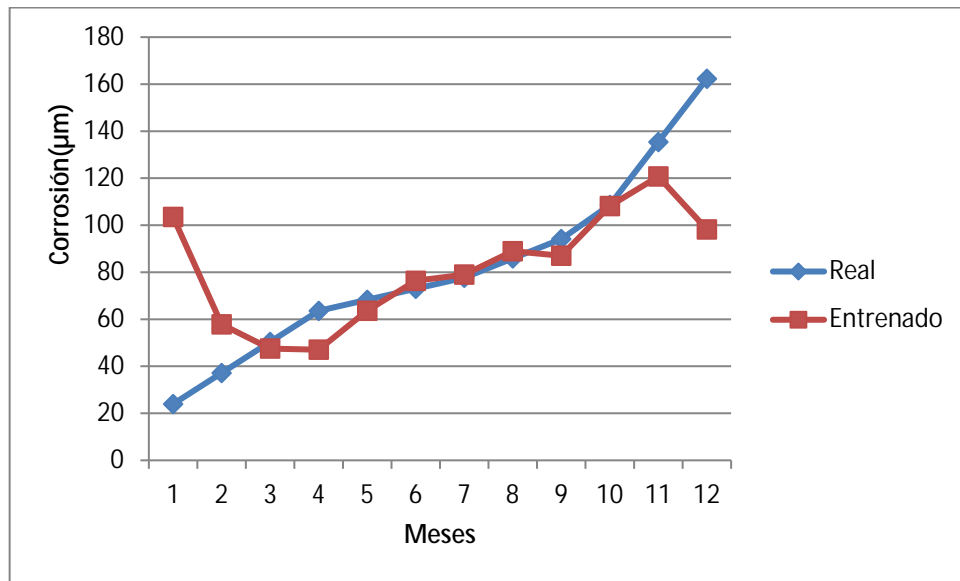
**Figura 29.** Grafica de correlaciones reales y entrenadas para el modelo MICAT en Puerto Cabello.

*Fuente: D'Santiago (2019)*



**Figura 30.** Grafica de correlaciones reales y entrenadas para el modelo MICAT + ISO CORRAG en Puerto Cabello.

*Fuente: D'Santiago (2019)*

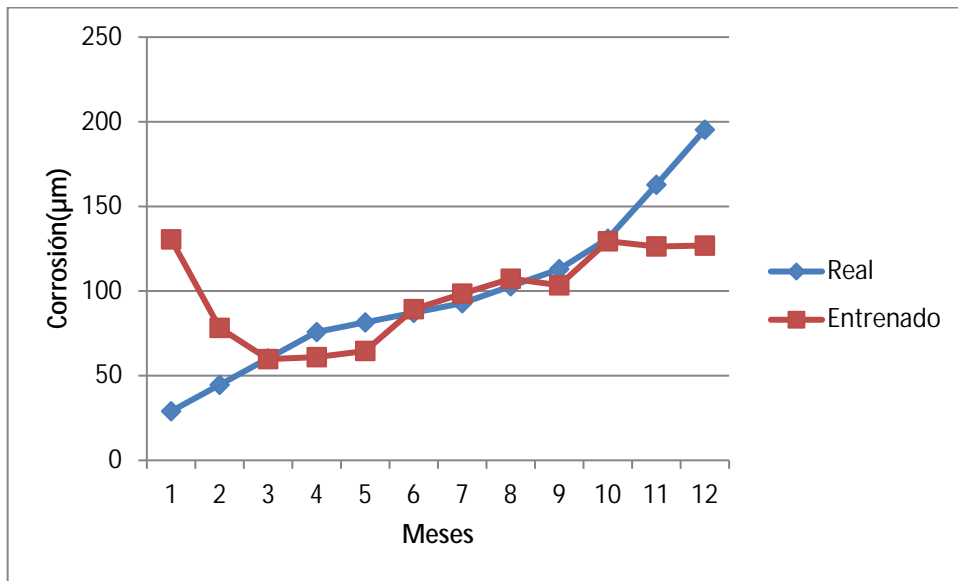


**Figura 31.** Grafica de correlaciones reales y entrenadas para el modelo ISO CORRAG en Puerto Cabello.

*Fuente: D'Santiago (2019)*

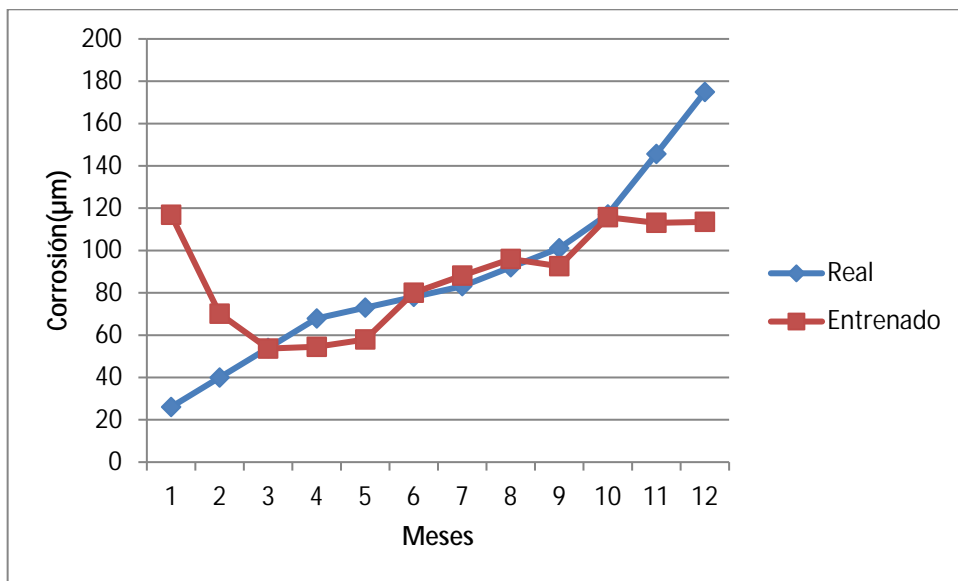
Para el grupo de graficas representando la zona de Puerto Cabello, podemos observar de cómo estas poseen el mismo comportamiento del grupo de Coro; con una gran variación al inicio, seguido por puntos coincidentes y terminando con la adaptación del comportamiento inicial. Cabe destacar que estas poseen valores o magnitudes de corrosión menos elevadas que el grupo de Coro. Siendo el error medio cuadrático del modelo MICAT en Puerto Cabello (Figura 29) de 0.1423, de la combinación de modelos MICAT + ISO CORRAG (Figura 30) de 0.1340 y por ultima del modelo de ISO CORRAG (Figura 31) de 0.1346.

Punto Fijo:



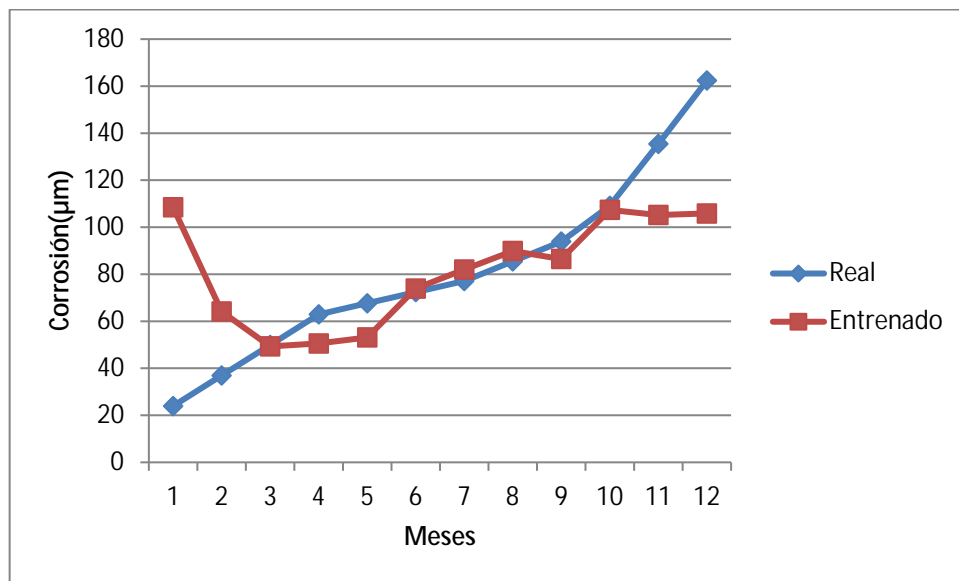
**Figura 32.** Grafica de correlaciones reales y entrenadas para el modelo MICAT en Punta Fijo.

*Fuente: D'Santiago (2019)*



**Figura 33.** Grafica de correlaciones reales y entrenadas para el modelo MICAT + ISO CORRAG en Punta Fijo.

*Fuente: D'Santiago (2019)*



**Figura 34.** Grafica de correlaciones reales y entrenadas para el modelo ISO CORRAG en Punto Fijo.  
*Fuente: D'Santiago (2019)*

Para la última ciudad de Punto Fijo, se observa que al igual que los grupos previos, las curvas resultantes reales y entrenadas poseen el mismo patrón de comportamiento. También se observa que posee valores muy semejantes a los valores del grupo de Puerto Cabello, teniendo esta los siguientes valores de RMSE para cada modelo aplicado; para el modelo MICAT, mostrado en la figura 32, un error de 0.1406, para el modelo mixto MICAT + ISO CORRAG (figura 33) un error de 0.1405 y por el ultimo el modelo ISO CORRAG representado en la figura 34, tiene obtuvimos un error de 0.1403. Siendo este set de RMSE de valores casi idénticos entre sí.

Velocidad de deposición de SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)	Concentración del SO <sub>2</sub>		CATEGORÍA
	mg/m <sup>3</sup>	ppm	
<10	<0.012	-	P <sub>0</sub>
>10-35	0.012	0.04	P <sub>1</sub>
>35-80	0.04	0.09	P <sub>2</sub>
>80-200	0.09	0.25	P <sub>3</sub>

**Figura 35.** Categorización de la contaminación por dióxido de azufre (ISO 9223:1992)  
*Fuente: Normas ISO 9223:1992*

Velocidad de deposición de Cloruros (mg/m <sup>2</sup> *día)	CATEGORÍA
< 3	S <sub>0</sub>
> 3-60	S <sub>1</sub>
> 60-300	S <sub>2</sub>
> 300-1500	S <sub>3</sub>

**Figura 36.** Categorización de la contaminación por aerosoles salinos (ISO 9223:1992)

*Fuente: Normas ISO 9223:1992*

CATEGORÍA	Tiempo de humectación (Horas/Año)	Ejemplo
$\tau_1$	< 10	Atmósfera interior climatizada
$\tau_2$	10 – 250	Atmósfera interna excepto espacios interiores no aireados
$\tau_3$	250 – 2500	Atmósfera exterior en regiones secas o muy frías
$\tau_4$	2500 – 5500	Atmósferas exteriores en todas las zonas, excepto la tropical seca y zonas frías
$\tau_5$	> 5500	Lugares no ventilados en regiones muy húmedas

**Figura 37.** Clasificación de tiempo de humectación.

*Fuente: Normas ISO 9223:1992*

Ciudad	Promedio SO <sub>2</sub>	Categoría	Promedio Cl	Categoría	TDH (h/a)	Categoría
Coro	1,454846	P <sub>0</sub>	29,46153	S <sub>1</sub>	4610	
Puerto Cabello	1,251769	P <sub>0</sub>	24,92307	S <sub>1</sub>		
Punto Fijo	1,454846	P <sub>0</sub>	24,92307	S <sub>1</sub>		

**Tabla 31.** Velocidades de deposición promedio de los agentes aeroquímicos, TDH y Corrosión.

*Fuente: D'Santiago (2019)*

La clasificación de la contaminación atmosférica debido a la velocidad promedio del dióxido de azufre en las tres ciudades de estudio están bajo la categoría de  $P_0$ , como lo muestra la Tabla 31, asimismo en esta se puede observar que en cuanto a la velocidad de deposición promedio de iones de cloruro caen bajo la categoría  $S_1$ . Según la norma ISO 9223, creada para la clasificación de la corrosión atmosférica (determinación y estimación), para la clasificación de la atmosfera es la HR y a su vez el TDH. Para el cálculo del TDH, la HR debe ser mayor o igual al 80% con una temperatura mayor a 0 °C, dando un total de 4610 horas al año, cayendo bajo la categoría de . Con dichos datos se puede ingresar a la tabla ilustrada en la Figura 38, se estima una corrosividad de C3, nivel media.

Sin embargo con los datos promedios estudiados y los diferentes tipos de modelos aplicados para las ciudades en estudio, podemos ver como los resultados arrojado bien sea por la datos de la regresión línea o por las redes neuronales, según la Figura 39, la corrosión existente a lo largo de las costas cae bajo la categoría C5, muy alta.

ACERO AL CARBONO															
	$\tau_1$			$\tau_2$			$\tau_3$			$\tau_4$			$\tau_5$		
	$S_0$ - $S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_0$ - $S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_0$ - $S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_0$ - $S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_0$ - $S_1$	$S_2$	$S_3$
$P_0$ - $P_1$	1	1	1 ó 2	1	2	3 ó 4	2 ó 3	3 ó 4	4	3	4	5	3 ó 4	5	5
$P_2$	1	1	1 ó 2	1 ó 2	2 ó 3	3 ó 4	3 ó 4	3 ó 4	4 ó 5	4	4	5	4 ó 5	5	5
$P_3$	1 ó 2	1 ó 2	2	2	3	4	4	4 ó 5	5	5	5	5	5	5	5

**Figura 38.** Estimación de la corrosividad atmosférica según la ISO 9223:1992.

*Fuente: Normas ISO 9223:1992*

Categoría	Pérdida de peso				Profundidad pic. $\mu\text{m}$
	ACERO	ZINC	COBRE	ALUMINIO	
1.g / m <sup>2</sup>	1-10	<0.7	<0.9	desprec.	—
$\mu\text{m}$	0.15-1.25	<0.1	<0.1	desprec.	—
2.g / m <sup>2</sup>	10-200	0.7-5	0.9-5	<0.6	
$\mu\text{m}$	1.25-25	0.1-0.7	0.1-0.6	<0.25	20
3.g / m <sup>2</sup>	200-400	5-15	5-12	0.6-2	
$\mu\text{m}$	25-50	0.7-12	0.6-1.3	0.25-0.8	50
4.g / m <sup>2</sup>	400-650	15-30	12-25	2-5	
$\mu\text{m}$	50-80	1.2-4.2	1.3-2.8	0.8-2	50-150
5.g / m <sup>2</sup>	>650	>30	>25	>5	
$\mu\text{m}$	>80	>4.2	>2.8	>2.0	150

**Figura 39.** Perdidas por corrosión atmosférica.

*Fuente: Normas ISO 9223:1992*

## CONCLUSIONES

1. Los peritajes de las estructuras deterioradas han demostrado siempre ser consecuencias de interacciones no previstas entre las estructuras y el medio ambiente, por lo que es importante la evaluación adecuada la agresividad de cada ambiente. Así como se muestra en los resultados arrojados, debido a una combinación de tipos de ambientes, mayor efecto de los agentes externos, resultando en una mayor corrosión.
2. La red neuronal diseñada para la predicción de corrosividad en el programa elegido, es sencilla con un total de 3 capas: entrada, oculta y salida. Sin necesidad de un mayor número de capas ocultas complicando la estructura e incrementando el número de iteraciones para disminuir el error.
3. Un mayor número de neuronas en la capa oculta no significa una mejor predicción de la red, ya que si, el número de neuronas establece la capacidad de encontrar las relaciones ni lineales de más alto orden y ayuda a reducir el error en el entrenamiento pero se tiene que tener en cuenta que las características de la red repercuten en el tiempo de entrenamiento y precisión.
4. Los modelos de regresión matemática utilizados fueron factibles debido a una semejanza o coincidencia de aproximadamente un 70% de los puntos evaluados.
5. La red neuronal desarrollada en esta investigación cumple, en su gran mayoría, el comportamiento por el cual fue creado. Existe una variación en los puntos de entrada y salida, deduciéndose que es por, o el hecho que la corrosión es un fenómeno poco predecible, o que la red neuronal, no toma en cuenta el tiempo en cual se está evaluando.
6. Basado en los datos arrojados por las correlaciones creadas usando valores promedios de los contaminantes aeroquímicos, o agentes externos, mediante el implemento o el uso de las normas ISO 9223:1997, se

categorizó la costa de los estados Carabobo y Falcón como una zona de alto nivel de corrosión ambiental.

## **RECOMENDACIONES**

1. Colocar estaciones meteorológicas en la costa de los estados Carabobo y Falcón con el fin de monitorear los parámetros meteorológicos localmente, obteniendo así una información más ajustada al área de estudio, y así poder generar correlaciones más precisas.
2. Complementar los modelos matemáticos utilizados, con el uso de regresiones lineales actualizadas, se podrían generar mejores resultados. El uso de otras variables adicionadas, incrementaría el porcentaje de precisión de datos arrojados.
3. Diseñar y crear redes neuronales en otra herramienta computacional, para la comparación de datos y comprobar la veracidad del programa actualmente utilizado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Fuentes Bibliográficas

- Arias, F. (2012): **El proyecto de investigación**, Caracas: Episteme.
- Barreiro, J. (2012). **Implementación de Redes Neuronales Artificiales para predecir presión de miscibilidad en la inyección de dióxido de carbono**. Trabajo de pregrado. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Balestrini, M. (2006). **Como se elabora el proyecto de investigación**. 7ma Edición. Caracas.
- Beauperthuy, J. & Scannone, R. (2005). **Corrosión: El cáncer de las estructuras**. B.R.S. Ingenieros, C.A. Caracas.
- Bolaños, E.; Pérez, A.; Vega G. & González J. (2014). **Monitoreo de corrosión atmosférica de acero en el sureste mexicano aplicando redes neuronales artificiales**. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México.
- González, J. (1989). **Control de la Corrosión: Estudio y Medida por técnicas Electroquímicas**. Grafipren, S.A. Madrid.
- Matich, J. (2001). **Redes Neuronales: Conceptos Básicos y Aplicaciones**. Argentina.
- Moreno, A.; Pérez, T. & Martínez, M. (2001). **El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado**. Instituto Mexicano del Transporte. México.
- Palella, S. & Martins, F. (2010). **Metodología de la investigación cuantitativa**. Caracas.
- Pérez, V.; Pérez, A. & Salama, I. (2006). **Estudio de los aspectos técnicos requeridos en la facultad de ingeniería de la Universidad de Carabobo que permiten la cuantificación de la corrosión del concreto armado en la ciudad de Valencia**. Trabajo de pregrado. Universidad de Carabobo. Barbula.
- Rincón, O. & miembros de la red DURAR. (2000). **Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado**. CYTED. Venezuela.

Sabino, C. (2004). **El proceso de la investigación**. Caracas: Panapo.

Tamayo y Tamayo, M. (1997): **El Proceso de la Investigación científica**. Editorial Limusa S.A. México.1997.

Toro, M. (2019). **Desarrollo de un sistema de detección y prevención de patologías en sistemas estructurales utilizados en la infraestructura urbana e industrial**. Trabajo de pregrado. Universidad José Antonio Páez. San Diego.

Velilla, E.; Villada, F. &Echeverria, F. (2009). **Modelos de pérdida de masa de acero por corrosión atmosférica en Colombia usando inteligencia computacional**. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

### **Fuentes Electrónicas**

Arismendi, E. (2013). **Tipos y Diseños de la investigación**.[http://planificaciondeproyectosemirarismendi.blogspot.com/2013/04/tipos-y-diseno-de-la-investigacion\\_21.html](http://planificaciondeproyectosemirarismendi.blogspot.com/2013/04/tipos-y-diseno-de-la-investigacion_21.html) consultado el 27 de julio del 2019.

Guillermo, J. (2016). **Las redes neuronales: qué son y por qué están volviendo**. <https://www.xataka.com/robotica-e-ia/las-redes-neuronales-que-son-y-por-que-estan-volviendo> consultada el 13 de julio del 2019.

Miembros de Arquitectura más Acero: Libertad y Diseño. **Corrosión**. <http://www.arquitecturaenacero.org/uso-y-aplicaciones-del-acero/soluciones-constructivas/corrosion> consultado el 6 de julio del 2019.