Universidad Central de Venezuela Facultad de Ciencias

Estudio Neuro-Difuso de $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C$ en el límite Triásico/Jurásico

Br. Dinibel Pérez Bello

Tutora: Dra. Nuri Hurtado Villasana

Trabajo Especial de Grado



Caracas, 20 de mayo del 2014



Universidad Central de Venezuela Facultad de Ciencias Escuela de Física

ESTUDIO NEURO-DIFUSO DE $\delta^{18}O$ Y $\delta^{13}C$ EN EL LÍMITE TRIÁSICO/JURÁSICO

Br. Dinibel Pérez Bello

Dra. Nuri Hurtado Villasana, Tutora

Caracas, 20 de mayo del 2014

Estudio Neuro-Difuso de $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C$ en el límite Triásico/Jurásico

Copyright © 2014

Universidad Central de Venezuela Dinibel Pérez Bello

ESTUDIO NEURO-DIFUSO DE $\delta^{18}O$ Y $\delta^{13}C$ EN EL LÍMITE TRIÁSICO/JURÁSICO

Br. Dinibel Pérez Bello

Trabajo Especial de Grado presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela como requisito parcial para optar al título de Licenciada en Física.

Dra. Nuri Hurtado Villasana, Tutora

Fecha

Quienes suscriben, miembros del Jurado que examinó el trabajo presentado por la Br. Dinibel Pérez Bello, titulado: "Estudio Neuro-Difuso de $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C$ en el límite Triásico/Jurásico" para optar al título de Licenciada en Física, consideramos que dicho trabajo cumple con los requisitos exigidos por los reglamentos respectivos y por lo tanto lo declaramos APROBADO en nombre de la Universidad Central de Venezuela.

Dra. Nuri Hurtado Villasana, Tutora

Dra. Rosa Mujica

Dr. Esteban Álvarez

Fecha

Fecha

Fecha

Caracas, 20 de mayo del 2014

A mis padres: Néstor y Belkis.

A mi hermano Jonás David.

A mi novio, amigos y compañeros que siempre me han prestado su apoyo y coolaboración.

A todos aquellos que han hecho este sueño posible.

Agradecimientos

Son muchos quienes han contribuido a lo largo de mi camino, para hacer este preciado y anhelado sueño posible, quienes en su mayoría me gustaría agradecer a continuación:

Antes que a nadie, agradezco a Dios por darme salud y vida; por escucharme en tantas oportunidades y brindarme paz cuando reinaba la frustración y la desesperación.

A mis padres Néstor y Belkis quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional ante cualquier obstáculo o problema, brindandome en cada oportunidad el mejor de los consejos. Nunca me alcanzarán las palabras para agradecer a quienes, trabajando juntos, sin descanso, me han dado lo necesario para ser quién soy ahora. Gracias por creer en mí incondicionalmente y enseñarme que todo en la vida es posible con constancia y sacrificio.

A mi hermano Jonás David, gracias por estar siempre allí, por tus palabras de aliento, por tu paciencia inagotable, por tu apoyo, por ayudarme siempre. Sigue estudiando para que seas el mejor Veterinario del mundo. Y aunque no lo diga siempre: Te quiero inmenso.

A mi tutora NURI HURTADO. Sin duda pieza fundamental en la elaboración de este trabajo. Quién siempre me sacó de apuros, dudas, por su comprensión en los momentos difíciles, siempre con una sonrisa. Gracias por tanto profe, por ser tan buena y enseñarme tanto, brindandome siempre otra oportunidad para hacerlo mejor y superarme. A mi amiga invaluable FÁTIMA. Quién tuvo el valor de soportarme durante toda la carrera. Te agradezco por siempre acompañarme, ayudarme en los momentos más fuertes, y celebrar los más felices. AMIGA, gracias por convertir cada momento único y llevadero. Espero que la vida nos regale muchos más momentos juntas.

A mis amigos y compañeros: Maximiliano (Gabriel), Enrique, Angelino y Jesús, quienes nunca estuvieron cansados para explicarme de nuevo cuando no entendía. Con quienes viví tantos buenos momentos e hicieron de mi paso por la Ciencias-UCV una experiencia única e irrepetible. A todos les deseo lo mejor, jamás dejemos de compartir.

A Hugo Alejandro. Me has brindado tanto cariño, siempre me regalaste una sonrisa cuando yo te mostraba mi peor cara de amargura. Por regalarme siempre palabras de aliento cuando creía no poder continuar. Gracias por formar parte de mi vida. Te amo.

A todos mis compañeros del laboratorio: Raamses, Eudomar, Chuchulino, Sinkler, quienes muchas veces me prestaron su apoyo.

Gracias a todos aquellos que han contribuido a lo largo del primer escalón de mi formación profesional y no los he mencionado acá. A todos mi más sincero agradecimiento.

RESUMEN

En el presente trabajo se ha utilizando la técnica computacional de sistemas neurodifusos (SND) mediante el módulo de ANFIS (Adaptative Neuro Fuzzy Inference System) de MatLab, con la finalidad de obtener un conjunto de ecuaciones estadísticas que permitan establecer relaciones sólidas entre los isótopos de Carbono 13 ($\delta^{13}C$) provenientes de muestras orgánicas $(\delta^{13}C_{org})$ o carbonatos $(\delta^{13}C_{carb})$ y el isótopo de Oxígeno 18 ($\delta^{18}O$). En trabajos anteriores, algunos autores han podido vincular, empíricamente, las variaciones de los $\delta^{13}C$ a una de las mayores y más enigmáticas extinciones masivas de la historia de la Tierra (límite Triásico - Jurásico), así como a importantes cambios climáticos que estuvieron involucrados en ese momento. Los datos utilizados en este trabajo provienen de los Alpes sur-occidentales del norte de Italia (Alpes de Bérgamo), en los cuáles, la estabilidad del reservorio atmosférico de carbono en el límite Triásico-Jurásico fue inferído de estimaciones de CO_2 , derivadas de medidas del isótopo de carbono. Mediante los resultados hemos podido establecer algunas relaciones matemáticas con un margen aceptable de inferencia (42%). Donde, en cada caso, se reproduce claramente la zona de la transición T/J, así como algunas de las anomalías más importantes, presentes en los perfiles de los isótopos de carbono.

ÍNDICE GENERAL

Re	Resumen v				
Ínc	lice G	eneral			ix
Lis	ta de	Figuras			xii
\mathbf{Lis}	ta de	Tablas		x	vii
1.	Intro	oducción			1
2.	Mar	co Teóric	0		5
	2.1.	Paleoclin	natología		5
		2.1.1.	Proxis paleoclimáticos		6
		2.1.2.	Isótopos y el cambio paleoclimatológico		7
		2.1.3.	Eras Geológicas		13
	2.2.	Método o	computacional: Sistemas Neuro Difusos		18
		2.2.1.	Lógica Difusa		18
		222	Redes Neuronales Artificiales		23

		2.2.3.	Sistema de inferencia difusa, ANFIS (Adaptative Neuro Fuzzy Inference System)	25
3.	Mare	co Geológ	gico	28
4.	Meto	odología		34
	4.1.	Digitaliza	ación de los datos	35
	4.2.	Análisis d	le linealidad entre los isótopos	36
	4.3.	Análisis r	no-lineal de los datos usando un Sistema Neuro Difuso (SND)	37
		4.3.1.	Determinación del número de reglas difusas y funciones de membresía	37
		4.3.2.	Definición de las ecuaciones de inferencia del SND	42
		4.3.3.	Evaluación	43
5.	Resu	iltados		44
	5.1.	Relación	lineal entre los Isótopos	45
	5.2.	Análisis r	no-lineal de los datos usando un Sistema Neuro Difuso (SND)	49
		5.2.1.	Número de reglas difusas y funciones de membresía	49
		5.2.2.	Ecuaciones de inferencia no lineales	51
6.	Cond	clusiones		62
Bił	oliogra	afía		65
A.	Dato	os utilizad	los	69
	A.1.	Sección Is	5eo	69
	A.2.	Sección C	Cantera Italcementi	71
в.	Regl	as difusas	s y funciones de pertenencia	72

C.	Isóto	otopo de Oxígeno 18 en función de los isótopos de Carbono 13 8		
	C.1.	Sección I	seo	88
		C.1.1.	Usando valores de $\delta^{13}C_{org}$	88
		C.1.2.	Usando valores de $\delta^{13}C_{carb}$	90
		C.1.3.	Usando valores de $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$	91
	C.2.	Sección o	cantera Italcementi	92
		C.2.1.	Usando valores de $\delta^{13}C_{org}$	92
		C.2.2.	Usando valores de $\delta^{13}C_{carb}$	93
		C.2.3.	Resultados entre $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$	94

LISTA DE FIGURAS

2	.1.	Modelo de Bohr: Un átomo consta de un núcleo (formado por protones y neutrones) y una nube de electrones	8
2	.2.	Proceso de evaporación del ${}^{18}O$ durante los períodos interglaciales y glaciales	12
2	.3.	Representación de las cuatro eras geológicas establecidas: Precámbri- co, Paleozoica, Mesozoica y Cenozoica sucesivamente.	13
2	.4.	La era Mesozoica se subdivide en 3 grandes períodos: Triásico, Jurási- co y Cretácico, cada uno de ellos con su fauna, vegetación y clima característico	15
2	.5.	La masa continental en el período Triásico hace 208 millones de años, conocido como Pangea.	15
2	.6.	A principios del Jurásico se dividió Pangea, dando origen a dos grandes continentes: Laurasia y Gondwana.	16
2	.7.	Conjuntos lógicos, visión de la lógica difusa y visión de la lógica clásica.	19
2	2.8.	Tipos de funciones de pertencia (membership function, mf). (a)triangular (b)trapezoidal (c)campana generalizada (d)gauseana (e)gauseana de dos caras (f) π (g)diferencia sigmoidal (h)producto sigmoidal	20
2	.9.	Estructura general de una neurona biológica	23
2	.10.	Funcionamiento general de una neurona artificial.	24

2.11.	Arquitectura ANFIS	26
3.1.	Ubicación de las secciones T/J. (A) Locación geográfica de los Al- pes Bérgamo: (1)cantera Italcementi y (5)Iseo. (B) paleoprofundida- des interpretadas y posición lo largo de la rampa de carbonato. (C) Esquema estratigráfico del límite T/J en los Alpes de Bérgamo. (D) Reconstrucción de la paleografía del período Jurásico temprano	29
3.2.	Columnas estratigráficas correspondientes a las secciones cantera Ital- cementi e Iseo y correlación de las secciones T/J	30
3.3.	(A) Contacto de los miembros Zu-3/Zu-4 en la sección Iseo. (B) Es- quema de la sucesión estratigráfica de límite T/J al oeste del Monte Albenza, se puede observar paraconformidad con un estrecho suelo duro de hierro	32
4.1.	Etapas de la metodología, necesarias para la obtención de las ecuaciones de inferencia para datos con comportamiento no lineal	35
4.2.	Interfaz gráfica del software Digitalize It (disponible en la web)	36
4.3.	Interfaz gráfica del módulo de ANFIS en MatLab (desde la línea de comando: anfisedit)	38
4.4.	Código utilizado en Matlab para la escogencia aleatoria del 50 $\%$ de los datos a profundidad utilizados en el entrenamiento	42
5.1.	Análisis de: (a) $\delta^{13}C_{carb}$ vs $\delta^{18}O$ y (b) $\delta^{13}C_{org}$ vs $\delta^{18}O$. Correspondientes a la seccón Iseo	45
5.2.	Análisis de: (a) $\delta^{13}C_{carb}$ vs $\delta^{18}O$ y (b) $\delta^{13}C_{org}$ vs $\delta^{18}O$. Correspondientes a la seccón cantera Italcementi.	46
5.3.	Perfiles: (A) $\delta^{13}C_{carb}$ y (B) $\delta^{13}C_{org}$ en la sección Iseo. Los valores con símbolo relleno representan los valores de núcleo y en símbolo sin relleno los valores calculados utilizando regresión lineal. La línea sombreada representa la transición T/J	47
5.4.	Perfiles: (A) $\delta^{13}C_{carb}$ y (B) $\delta^{13}C_{org}$ en la sección cantera Italcementi. Los valores con símbolo relleno representan los valores de núcleo y en símbolo sin relleno los valores calculados utilizando regresión lineal. La línea sombreada representa la transición T/J	48

xiii

5.5.	Error cuadrático medio de la sección Iseo:(A) $\delta^{13}C_{org}$ y (B) $\delta^{13}C_{carb}$ y de la seción cantera Italcementi: (C) $\delta^{13}C_{org}$ y (D) $\delta^{13}C_{carb}$ para cada función de membresía usando: 2 (rombo) y 3 (cuadrado) reglas difusas.	50
5.6.	Perfiles de $\delta^{13}C_{org}$ en la sección Iseo: (A) $\delta^{13}C_{org}$ medido y (B) $\delta^{13}C_{org}$ inferido. La línea sombreada representa la transición T/J. (C) Cross- plot $\delta^{13}C_{org}$ de núcleo vs $\delta^{13}C_{org}$ inferido	53
5.7.	Perfiles de $\delta^{13}C_{carb}$ en la sección Iseo: (A) $\delta^{13}C_{carb}$ medido y (B) $\delta^{13}C_{carb}$ inferido. La línea sombreada representa la transición T/J. (C) Cross- plot $\delta^{13}C_{org}$ de núcleo vs $\delta^{13}C_{carb}$ inferido	55
5.8.	Perfiles de $\delta^{13}C_{org}$ en la sección cantera Italcementi: (A) $\delta^{13}C_{org}$ medido y (B) $\delta^{13}C_{org}$ inferido. La línea sombreada representa la transición T/J. (C) Crossplot $\delta^{13}C_{org}$ de núcleo vs $\delta^{13}C_{org}$ inferido	57
5.9.	Perfiles de $\delta^{13}C_{carb}$ en la sección cantera Italcementi: (A) $\delta^{13}C_{carb}$ medi- do y (B) $\delta^{13}C_{carb}$ inferido. La línea sombreada representa la transición T/J. (C) Crossplot $\delta^{13}C_{org}$ de núcleo vs $\delta^{13}C_{carb}$ inferido	59
A.1.	Datos utilizados, de profundidad aproximada 45 metros; la línea ho- rizontal representa la transcición Triásico/Jurásico.	70
A.2.	Datos utilizados, de profundidad aproximada 35 metros, la línea horizontal representa la transición Triásico/Jurásico	71
B.2.	Resultados a profundidad provenientes de: datos de núcleo (núcleo), inferencia con 2 reglas difusas (2R) y 3 reglas difusas (3R). Fun- ciones de membresía: Campana generalizada (FM:gbell) y Gaussiana (FM:gauss). Sección Iseo	73
В.З.	Resultados a profundidad provenientes de: datos de núcleo (núcleo), inferencia con 2 reglas difusas (2R) y 3 reglas difusas (3R). Funciones de membresía: gaussiana de 2 caras (FM:gauss2) y pi (FM:pi). Sección Iseo	74
B.4.	Resultados a profundidad provenientes de: datos de núcleo (núcleo), inferencia con 2 reglas difusas (2R) y 3 reglas difusas (3R). Funciones de membresía: diferencia sigmoidal (FM:dsig) y producto sigmoidal (FM:psig). Sección Iseo.	75
B.5.	Resultados a profundidad provenientes de: datos de núcleo (núcleo), inferencia con 2 reglas difusas (2R) y 3 reglas difusas (3R). Funciones de membresía: Triangular (FM:tri) y Trapezoidal (FM:trap). Sección Iseo.	76

B.6.	Resultados a profundidad provenientes de: datos de núcleo (núcleo), inferencia con 2 reglas difusas (2R) y 3 reglas difusas (3R). Fun- ciones de membresía: Campana generalizada (FM:gbell) y Gaussiana (FM:gauss). Sección Iseo	77
B.7.	Resultados a profundidad provenientes de: datos de núcleo (núcleo), inferencia con 2 reglas difusas (2R) y 3 reglas difusas (3R). Funciones de membresía: gaussiana de 2 caras (FM:gauss2) y pi (FM:pi). Sección Iseo	78
B.8.	Resultados a profundidad provenientes de: datos de núcleo (núcleo), inferencia con 2 reglas difusas (2R) y 3 reglas difusas (3R). Funciones de membresía: diferencia sigmoidal (FM:dsig) y producto sigmoidal (FM:psig). Sección Iseo.	79
B.9.	Resultados a profundidad provenientes de: datos de núcleo (núcleo), inferencia con 2 reglas difusas (2R) y 3 reglas difusas (3R). Funciones de membresía: Triangular (FM:tri) y Trapezoidal (FM:trap). Sección cantera Italcementi.	80
B.10.	Resultados a profundidad provenientes de: datos de núcleo (núcleo), inferencia con 2 reglas difusas (2R) y 3 reglas difusas (3R). Fun- ciones de membresía: Campana generalizada (FM:gbell) y Gaussiana (FM:gauss). Sección cantera Italcementi.	81
B.11.	Resultados a profundidad provenientes de: datos de núcleo (núcleo), inferencia con 2 reglas difusas (2R) y 3 reglas difusas (3R). Funciones de membresía: gaussiana de 2 caras (FM:gauss2) y pi (FM:pi). Sección cantera Italcementi.	82
B.12.	Resultados a profundidad provenientes de: datos de núcleo (núcleo), inferencia con 2 reglas difusas (2R) y 3 reglas difusas (3R). Funciones de membresía: diferencia sigmoidal (FM:dsig) y producto sigmoidal (FM:psig). Sección cantera Italcementi.	83
B.13.	Resultados a profundidad provenientes de: datos de núcleo (núcleo), inferencia con 2 reglas difusas (2R) y 3 reglas difusas (3R). Funciones de membresía: Triangular (FM:tri) y Trapezoidal (FM:trap). Sección cantera Italcementi.	84
B.14.	Resultados a profundidad provenientes de: datos de núcleo (núcleo), inferencia con 2 reglas difusas (2R) y 3 reglas difusas (3R). Fun- ciones de membresía: Campana generalizada (FM:gbell) y Gaussiana (FM:gauss). Sección cantera Italcementi.	85

	•
XV	/1

B.15.	Resultados a profundidad provenientes de: datos de núcleo (núcleo), inferencia con 2 reglas difusas (2R) y 3 reglas difusas (3R). Funciones de membresía: gaussiana de 2 caras (FM:gauss2) y pi (FM:pi). Sección cantera Italcementi.	86
B.16.	Resultados a profundidad provenientes de: datos de núcleo (núcleo), inferencia con 2 reglas difusas (2R) y 3 reglas difusas (3R). Funciones de membresía: diferencia sigmoidal (FM:dsig) y producto sigmoidal (FM:psig). Sección cantera Italcementi	87
C.1.	Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{org}$, donde las reglas difusas están representadas con: [2] en rombo; [3] en cuadrado y [4] en triángulo.	89
C.2.	Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{carb}$, donde las reglas difusas están representadas con: [2] en rombo; [3] en cuadrado y [4] en triángulo.	90
C.3.	Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$, donde las reglas difusas están representadas con: [2 1] rombos llenos; [1 2] rombos vacíos; [3 1] cuadros llenos; [1 3] cuadros vacíos y [2 2] triángulos. Refiriéndonos en todos los casos a las combinaciones :[$\delta^{13}C_{org}$ $\delta^{13}C_{carb}$].	92
C.4.	Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{org}$, donde las reglas difusas están representadas con: [2] en rombo; [3] en cuadrado y [4] en triángulo.	93
C.5.	Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{carb}$, donde las reglas difusas están representadas con: [2] en rombo; [3] en cuadrado y [4] en triángulo.	94
C.6.	Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$, donde las reglas difusas están representadas con: [2 1] en rombo; [1 2] en cuadrado; [3 1] en triángulo; [1 3] en equis y [2 2] en círculo	95

LISTA DE TABLAS

2.1.	Isótopos de Oxígeno y Carbono, abundancia promedio en la naturaleza y su aplicación en investigaciones referentes a cambios paleoclimáticos.	9
4.1.	Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{18}O$, al combinar las diferentes funciones de membresía, usando 2 y 3 reglas difusas. Sección Iseo.	40
4.2.	Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{13}C_{carb}$ y $\delta^{18}O$, al combinar las diferentes funciones de membresía, usando 2 y 3 reglas difusas. Sección Iseo.	40
4.3.	Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{18}O$, al combinar las diferentes funciones de membresía, usando 2 y 3 reglas difusas. Sección cantera Italcementi.	41
4.4.	Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{13}C_{carb}$ y $\delta^{18}O$, al combinar las diferentes funciones de membresía, usando 2 y 3 reglas difusas. Sección cantera Italcementi.	41
5.1.	Ecuaciones características y valores de R^2 de las gráficas crossplot entre $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$. Pertenecientes a la sección Iseo	45
5.2.	Ecuaciones características y valores de R^2 de las gráficas crossplot entre $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$. Pertenecientes a la sección cantera Ital- cementi.	46

5.3.	Parámetros escogidos para realizar la inferencia. Correspondientes a la sección Iseo	51
5.4.	Parámetros escogidos para realizar la inferencia. Correspondientes a la sección cantera Italcementi.	51
5.5.	Comparación entre RL y SND para la inferencia de $\delta^{13}C_{org}$. Sección Iseo.	60
5.6.	Comparación entre RL y SND para la inferencia de $\delta^{13}C_{carb}$. Sección Iseo.	60
5.7.	Comparación entre RL y SND para la inferencia de $\delta^{13}C_{org}$. Sección cantera Italcementi.	61
5.8.	Comparación entre RL y SND para la inferencia de $\delta^{13}C_{carb}$. Sección cantera Italcementi.	61
C.1.	Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{org}$, al combinar las diferentes funciones de membresía, usando [2], [3] y [4] reglas difusas.	89
C.2.	Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{carb}$, al combinar las diferentes funciones de membresía, usando [2], [3] y [4] reglas difusas.	90
C.3.	Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$, al combinar las funciones de membresía, usando [2 1], [1 2], [3 1], [1 3] Y [2 2] reglas difusas, ésto representa $[\delta^{13}C_{org} \ \delta^{13}C_{carb}]$.	91
C.4.	Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{org}$, al combinar las diferentes funciones de membresía, usando [2], [3] y [4] reglas difusas.	93
C.5.	Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{carb}$, al combinar las diferentes funciones de membresía, usando [2], [3] y [4] reglas difusas.	94
C.6.	Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$, donde las reglas difusas están representadas con: [2 1] rombos llenos; [1 2] rombos vacíos; [3 1] cuadros llenos; [1 3] cuadros vacíos y [2 2] triángulos. Refiriéndonos en todos los casos a las combinaciones :[$\delta^{13}C_{org}$ $\delta^{13}C_{carb}$].	95

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

La transición Triásico/Jurásico está marcada por una de las más importantes extinciones en masa en la historia de la Tierra. El triásico es considerado como el período geológico que se extiende desde hace 245 hasta 208 millones de años. De acuerdo a diferentes estudios, diversos autores ([1], [2]) coinciden con que el período Triásico terminó con una extinción masiva de especies, tanto de ambientes marinos como no marinos, sin embargo se estima que un grupo pequeño de especies no fue, aparentemete, afectado en dicha extinción masiva [3].

Diversos modelos han sido propuestos para explicar la extinción del final del período Triásico, tanto modelos graduales como modelos totalmente catastróficos. Entre dichos modelos se incluyen, al cambio en el nivel del mar y anoxia en los océanos [4], al gran nivel de aridez en el supercontinente Pangea [5], al impacto bólido [6] y al vulcanismo de la Provincia magmática del Atlántico Central, también conocida por sus siglas en inglés CAMP [7]. Se ha logrado relacionar una importante anomalía en el ciclo global del CO_2 con el final del Triásico, la cual puede ser traducida como un importante cambio en la estabilidad climática de dicho período [1]. Los registros de las curvas de isótopos de carbono relacionados con el límite T/J están marcados por anomalías negativas: en Austria [8] se identificó un 'pulso' negativo en el límite T/J ; en Hungría [9] ha sido descrita una anomalía negativa en los isótopos de carbono orgánico y carbonatado, en los sedimentos que cubren el límite T/J.

En un trabajo procedente de la Bahía de Penarth (sur de Gales, Reino Unido) [10], se presentan datos geoquímicos y sedimentológicos, correspondientes al final del Triásico en donde se evidencian cambios en el ciclo del CO_2 y los mismos sugieren cambios en el clima. Siguiendo la misma línea de investigación, en otro trabajo, se han utilizado perfiles de $\delta^{13}C$ como indicadores del ciclo global de CO_2 [11], en dichos perfiles se ha observado un pulso de isótopo de carbono negativo, que coincide justamente, con dicha crisis biótica, probablemente los altos niveles de CO_2 fueron responsables de la masiva extinción del final de Triásico. Isótopos estables, como el $\delta^{13}C$ y el $\delta^{18}O$, han sido utilizados para realizar resconstrucciones paleoclimáticas de la era geológica Holoceno [12].

Los métodos de regresión lineal simple han sido empleados ampliamente en la geofísica y en la geología para estudiar la relación entre dos o más parámetros. Sin embargo, en estas áreas, debido a las hetereogeneidades de los parámetros involucrados, existe un incremento de la dispersión de los datos, de forma tal que no existe una tendencia que permita establecer una relación lineal entre ellos. En los últimos años se ha implementado el uso de ciertos algoritmos computacionales ([13], [14]), ya que lo que se ha evidenciado es que el comportamiento es no lineal. El Sistema Neuro Difuso (SND) es un algoritmo híbrido que combina las bondades de la lógica difusa junto con las de las redes neuronales artificiales, y en los últimos años ha sido utilizado para tratar problemas de naturaleza no lineal entre dos o más variables. Las aplicaciones de este algoritmo híbrido de inteligencia artificial son diversas y abarcan muchísimas áreas de conocimiento [15].

Los sistemas neuro difusos se respaldan en un proceso estadístico donde los datos de entrada son interpretados según reglas difusas, que pueden determinarse a partir de las características de los valores a inferir. Uno de los algoritmos desarrollados para un SND es el método llamado ANFIS (Adaptative Neuro Fuzzy Inference System), que permite sincronizar o crear las reglas del conjunto difuso, que sirve para dividir la capa 1 de la red neuronal [16]. Esta técnica ha sido utilizada anteriormente para inferir perfiles de $\delta^{18}O$ a partir de proxis magnéticos, obteniéndose resultados satisfactorios [17] y también ha sido utilizada para la inferencia de la velocidad de las ondas de compresión utilizando $\delta^{13}C$ [18].

En nuestro trabajo buscamos, a través de los sistemas neuro difusos, obtener un conjunto de ecuaciones que relacionen matemáticamente el isótopo de Carbono $(\delta^{13}C_{org}, \delta^{13}C_{carb})$ con el isótopo de Oxígeno $(\delta^{18}O)$. Estas ecuaciones servirán para establecer una posible asociación matemática entre vegetación, dieta, hábitat de los seres vivientes en la era Mesozoica (transición Triásico / Jurásico) con los cambios climáticos presentes en dicha era, representados por los $\delta^{18}O$.

Los datos que utilizaremos en este trabajo, comprenden, a la sección cantera Italcementi y a la sección Iseo, ambas ubicadas en los Alpes sur occidentales al norte de Italia (Alpes de Bérgamo), la geología en ambas secciones es similar, y están separadas entre sí una distancia de 45 Kilómetros [19]. En el siguiente capítulo se describe el marco teórico, donde se definirán los principales conceptos paleoclimatológicos utilizados, así como también la teoría referente a la técnica computacional que se aplica. Posteriormente, en el marco geológico, se explica la geología de la zona en estudio. Una vez definido todo esto, en el marco metodológico, se muestra el proceso de elaboración, que va desde la digitalización de los datos, hasta la obtención de los modelos, a profundidad, inferidos utilizando ANFIS (Adaptative Neuro Fuzzy Inference System). Finalmente se presenta el análisis de los resultados con sus respectivas conclusiones.

capítulo 2

_MARCO TEÓRICO

En este capítulo se tratarán los conceptos más utilizados en este trabajo, en el que se espera establecer relaciones matemáticas entre los isótopos de Carbono 13 ($\delta^{13}C$) provenientes de muestras orgánicas ($\delta^{13}C_{org}$) y/o carbonatos ($\delta^{13}C_{carb}$) y el isótopo de Oxígeno 18 ($\delta^{18}O$). Primeramente, se hará referencia a los conceptos paleoclimatológicos implicados y seguidamente se expondrá todo lo referente a la técnica computacional utilizada.

2.1. Paleoclimatología

La paleoclimatología, es la ciencia que se encarga de proporcionar datos, hipótesis y teorías que ayuden a aumentar y mejorar el conocimiento de las condiciones climáticas en las pasadas eras geológicas. La paleoclimatología se vale de un diverso grupo de métodos y estrategias para reconstruir e interpretar los cambios climáticos en el pasado; los cules suelen estar reflejados en modificaciones importantes de sedimentos, flora y fauna, que han quedado fosilizados a lo largo de los años, y son conocidos como proxis.

2.1.1. Proxis paleoclimáticos

La paleoclimatología se basa en el estudio de los llamados proxis paleoclimáticos, los cuales son registros naturales de la variabilidad climática, ya que los cambios en el clima a lo largo del tiempo, modifican los sedimentos, la flora y la fauna, dejando así diferentes huellas, que pueden ser utilizadas como registros de dichos cambios. Entre los principales proxis paleoclimáticos podemos encontrar:

- Corales: Los corales construyen sus esqueletos con carbonato de calcio, un mineral que extraen de las aguas del mar. El carbonato contiene isótopos de carbono y de oxígeno, así como trazas de minerales, que pueden ser usados para determinar la temperatura del agua en que el coral creció. Estos registros de la temperatura, pueden ser usados para reconstruir el clima durante el período en que vivió el coral.
- Polen fósil: Al florecer, las plantas generan granos de polen, sus formas distintivas pueden ser utilizadas para identificar el tipo de planta de la cual provienen. Dado que los granos de polen se preservan bastante bien en las capas sedimentarias, un análisis de los granos de polen en cada capa indica qué clase de planta crecía en el tiempo en que el sedimento fue depositado. Entonces, se pueden hacer inferencias sobre el clima basándose en los tipos de plantas encontradas en cada capa.
- Anillos de árboles: El crecimiento de los árboles se ve influenciado por las condiciones climáticas, entonces, los patrones en los anchos de los anillos de los árboles, la densidad y la composición isotópica reflejan cambios en el clima. Los árboles pueden crecer entre cientos y miles de años, por lo tanto, pueden generar registros anuales del clima durante siglos o milenios.

- Núcleos de hielo: Un núcleo de hielo es una muestra cilíndrica de hielo, que se obtiene mediante la perforación del sustrato a diferentes profundidades. El hielo proporciona un registro detallado del cambio de las temperaturas ambientales. Las burbujas de aire atrapadas en el hielo registran variaciones en la composición atmosférica, en las muestras se encuentran también otros productos atmosféricos como el polvo que había en el aire, cenizas volcánicas, polen, etc.
- Sedimentos lacustres y oceánicos: Los diferentes sedimentos lacustres y oceánicos, obtenidos a través de los testigos de sedimentos del suelo en las cuencas, incluyen fósiles y materias químicas, a través de los cuales se pueden hacer estudios acerca de la variación isotópica del oxígeno.

2.1.2. Isótopos y el cambio paleoclimatológico

Los isótopos, cuya distribución en los compuestos naturales se rige por las condiciones ambientales en determinado momento, son uno de los instrumentos más poderosos para investigar las variaciones climáticas y la respuesta del medioambiente a dichas variaciones.

Cada elemento de la tabla periódica consta de un núcleo y de un conjunto de electrones; el núcleo está formado por protones y por neutrones (ver figura 2.1). Los isótopos de un elemento dado se localizan en la misma posición de la tabla periódica, pero se distinguen entre sí por el número de neutrones presentes en su núcleo, es decir, todos los isótopos de un mismo elemento tienen el mismo número de electrones y protones, pero se diferencian por el número de neutrones. A través de los cálculos de las concentraciones de isótopos de ciertos elementos químicos en proxies, es posible obtener algún tipo de registro acerca de la variabilidad paleoclimática a lo largo de la historia de la Tierra.



Figura 2.1: Modelo de Bohr: Un átomo consta de un núcleo (formado por protones y neutrones) y una nube de electrones

Se conocen principalmente dos tipos de isótopos, los radioactivos y los naturales:

- Los isótopos radioactivos son aquellos que no pueden mantener la estabilidad de su núcleo, es decir, tienen un núcleo atómico inestable y emiten energía y partículas cuando decaen en un isótopo diferente más estable. La principal causa de la inestabilidad reside en el exceso de protones o de neutrones.
- Los isótopos naturales, son aquellos que, a diferencia de los radioactivos son estables por naturaleza y su abundancia promedio natural está definida.

Concretamente en este trabajo se estudiarán los isótopos 13 del carbono y 18 del oxígeno, siendo ambos isótopos naturales. En la tabla 2.1 colocamos los porcentajes de

Elemento	Isótopo	Abundancia ($\%)$	Uso
	^{12}C	98,93	Determinar la dieta de
Carbono	^{13}C	1,07	herbívoros, el tipo de vegetación
	^{14}C	*	y hábitat
	^{16}O	99,757	Inferir el clima,
Oxígeno	^{17}O	0,038	tipo de hábitat y
	^{18}O	0,205	patrones de migración

abundancia promedio en la naturaleza y el uso principal que se les da a estos isótopos.

Tabla 2.1: Isótopos de Oxígeno y Carbono, abundancia promedio en la naturaleza y su aplicación en investigaciones referentes a cambios paleoclimáticos.

A continuación describimos estos isótopos, sus principales características y aplicaciones.

2.1.2.1. Carbono y sus isótopos

El elemento químico carbono tiene dos isótopos estables, el ${}^{12}C$ y el ${}^{13}C$. Casi el 99% del CO_2 atmosférico contiene carbono 12; una pequeña parte, el 1% del CO_2 , es algo más pesado, ya que contiene carbono 13. El símbolo $\delta^{13}C$ indica la desviación de la concentración isotópica de ${}^{13}C$ en cualquier muestra, viva o fósil, con respecto a una media estándar, que suele ser el carbono contenido en el carbonato cálcico de la concha de un determiando fósil marino denominado PDB (Pee Dee Belemnite), o VPDB, perteneciente a una formación geológica del Cretácico en Carolina del Norte (USA), y cuyo valor ha sido establecido por la Agencia Internacional de la Energía Atómica, con sede en Viena (Austria).

La ecuación para la desviación isotópica (δ) de un elemento j respecto a su par más abundante k es la siguiente:

$$\delta j = \frac{(j/k)_{(muestra)} - (j/k)_{(standard)}}{(j/k)_{(standard)}}$$

En el caso del carbono $({}^{13}C/{}^{12}C)_{(standard)}$ es igual a 0,0112372 (VPDB).

El contenido de $\delta^{13}C$ del carbono de los paleosuelos depende, en gran parte, del tipo de vegetación que haya existido. Todas las plantas absorben el carbono a través del ciclo fotosintético y pueden clasificarse en dos grandes grupos: plantas C3 y plantas C4 con valores de $\delta^{13}C$ bastante diferentes.

- Plantas C3: Se denominan plantas C3 a las que, durante el proceso de la fotosíntesis, absorben 3 átomos de carbono. Alrededor del 85 % de las especies de plantas son C3, tales como: granos, algodón, tabaco, espinacas, soja, la mayoría de los árboles y hierbas de césped. Las plantas C3 son características de climas templados y húmedos. Tienen unos valores de $\delta^{13}C$ comprendidos entre -22 % y -30 %
- Plantas C4: Las plantas C4 son aquellas que, durante el proceso de la fotosíntesis, fijan 4 átomos de carbono. En su mayoría son hierbas tropicales, prevalecen mayormente en climas secos con largos períodos de aridez y con baja humedad relativa, tienen condicionada su existencia a lugares con alta intensidad lumínica y temperaturas también elevadas. Sólo alrededor del 0,4 % de las aproximadamente 260.000 especies conocidas de plantas, son del tipo C4. Comprenden valores de $\delta^{13}C$ entre -10 % y -14 %.

Tomando en cuenta el contenido de $\delta^{13}C$ del carbono de los paleosuelos es posible establecer una relación entre el contenido de carbono, vegetación y clima. Cuando hayan dominado las plantas tipo C3 el contenido de $\delta^{13}C$ será menor y mayor al aumentar la presencia de las plantas tipo C4.

2.1.2.2. Oxígeno y sus isótopos

El oxígeno tiene tres isótopos naturales: ${}^{16}O$, ${}^{17}O$ y ${}^{18}O$. En la naturaleza se encuentra en mayor abundancia el ${}^{16}O$, luego en un menor porcentaje se encuentra el ${}^{18}O$ y con un porcentaje aún menor el ${}^{17}O$ (ver tabla 2.1). El comportamiento de las moléculas de éstos isótopos no es igual, pues existen pequeñas diferencias en el comportamiento, tanto químico como físico, ocasionado por un fenómeno denominado fraccionamiento isotópico. La causa principal de esta diferencia en su comportamiento está relacionada con la masa, pues la molécula de ${}^{18}O$ al contener mayor número de protones es más pesada, posee menor movilidad y mayor energía de asociación en sus enlaces.

El fraccionamiento, es el responsable de los cambios de la composición isotópica del agua en el paso de una fase a otra [20]. Durante el proceso de evaporación se requiere de una energía mayor para evaporar una molécula de $H_2^{18}O$ que una de $H_2^{16}O$. Las moléculas de agua más pesadas tienden a evaporarse de un cuerpo de agua con mayor dificultad que las ligeras; y una vez en el estado de vapor, tienden a condensarse y a volver antes al océano que las que contienen el isótopo más liviano.

En la imagen 2.2 se ilustra el proceso de fraccionamiento del oxígeno, donde durante los períodos glaciares (época fría), las moléculas que contienen el isótopo ${}^{16}O$, son las que se evaporan con mayor facilidad, debido a que la energía térmica no es

Capítulo 2: Marco Teórico

suficiente para evaporar a los ¹⁸O. Así luego de condensarse, el agua precipita bajo la forma de nieve, enriquecida en ¹⁶O, que luego se convierte en hielo glacial; quedando a la vez el agua de mar enriquecida en ¹⁸O. Durante los períodos interglaciares (época cálida), cuando se produce el retorno de las masas de agua de los mantos de hielo y glaciares al océano, el ¹⁶O contenido en el hielo vuelve al sistema, por lo que las relaciones isotópicas resultantes son más livianas a las de las épocas frías.



Figura 2.2: Proceso de evaporación del ¹⁸O durante los períodos interglaciales y glaciales.

La dependencia de la temperatura queda registrada en la composición isotópica de las conchas de los microorganismos marinos, ya que estos construyen su caparazón de caliza a partir de la reacción del agua con el dióxido de carbono disuelto en el agua. Por tanto, la fracción isotópica del caparazón dependerá de la relación isotópica del agua de mar al momento de su formación. Esto se traduce a que, concentraciones altas de ¹⁸O implican bajas temperaturas y valores bajos de ¹⁸O implican altas temperaturas. Las proporciones relativas de ¹⁸O con respecto al ¹⁶O en estas muestras son expresadas en términos de desviaciones, $\delta^{18}O$, del Agua Oceánica Media Estándar (VSMOW -Vienna Standard Mean Ocean Water), la cual viene dada por:

$$\delta^{18}O = \frac{({}^{18}O/{}^{16}O)_{(muestra)} - ({}^{18}O/{}^{16}O)_{(standard)}}{({}^{18}O/{}^{16}O)_{(standard)}}$$

siendo el valor de $({}^{18}O/{}^{16}O)_{(standard)} = 0.0025$ (VSMOW)

2.1.3. Eras Geológicas

Una era geológica es una unidad geocrológica que se refiere a un lapso de tiempo extremadamente largo, millones de años, que abarca importantes procesos geológicos y biológicos. La historia de nuestro planeta tierra se halla dividida en cuatro eras: la era precámbrica, la era paleozoica o primaria, la era mesozoica o secundaria y la era cenozoica o terciaria.



Figura 2.3: Representación de las cuatro eras geológicas establecidas: Precámbrico, Paleozoica, Mesozoica y Cenozoica sucesivamente.

- La era precámbrica está considerada como la más larga de las etapas de la tierra, se le atribuye una duración de aproximadamente 4027 millones de años. A pesar de ser una etapa tan larga y en la que debieron ocurrir muchos sucesos, los geólogos casi no tienen infomación sobre ella, ya que las rocas formadas durante el precámbrico han sido erosionadas, enterradas o metamorfizadas.
- La era paleozoica o primaria se extendió por más de 290 millones de años. Esta era se subdivide en los siguiente períodos: Cámbrico, Ordovicio, Silúrico, Devónico, Carbonífero y Pérmico. Se presume que al principio sólo habían seres acuáticos, pero que con el tiempo aumentó la vida y muchos animles desarrollaron caparazón o esqueleto y lograron conquistar la tierra. Hay evidencias de que aparecieron los moluscos, anfibios y los reptiles.
- La era mesozoica o secundaria es también conocida como la era de los dinosaurios, se estima que duró aproximadamente unos 186 millones de años. Esta era se subdivide en tres períodos: **Triásico**, **Jurásico** y Cretácico. Se han encontrado indicios de que en el transcurso de esta era los continentes fueron adquiriendo su configuración actual. Se estima que el clima jugó un papel primordial para la evolución de la vida en la era mesozoica.
- La era Cenozoica o terciaria es la última y más reciente era geológica, empezó hace 65 millones de años aproximadamente y se extiende hasta la actualidad. Se mide en varios períodos: al Paleoceno, el Eoceno, el Oliogoceno, el Mioceno, el Plioceno, el Pleistoceno y el Holoceno, estos dos últimos conocidos también como la edad del hombre.

Para la elaboración de este trabajo nos vamos a centrar en la Era Mezosoica, específicamente en los períodos Triásico y Jurásico, los cuales se describen a continuación:.



Figura 2.4: La era Mesozoica se subdivide en 3 grandes períodos: Triásico, Jurásico y Cretácico, cada uno de ellos con su fauna, vegetación y clima característico

• Período Triásico: Es el primer período de la era Mesozoica (245 - 208 millones de años). Durante el Triásico casi todas las masas de tierra del planeta estaban concentradas en un sólo supercontienente, que se situaba más o menos sobre el ecuador, llamado Pangea (ver figura 2.5). Un extenso golfo que se abría en su parte oeste formaba el Mar de Tethys, el resto de las aguas formaban el océano de Panthalassa. Al final de este período comenzaron los movimientos de ruptura que provocaron la fragmentación de Pangea.



Figura 2.5: La masa continental en el período Triásico hace 208 millones de años, conocido como Pangea.

Algunos indicios encontrados sugieren que el gran tamaño de Pangea, probablemente motivó que su clima fuese fuertemente continental, es decir, con veranos bastante calurosos e inviernos totalemnete fríos. A principios del Triásico, nuevos tipos de corales aparecieron formando arrecifes de tamaño moderado. Hay evidencias de que existían varios tipos de reptiles marinos, incluyendo los primeros plesiosaurios e ictiosaurios. En la parte final del Triásico, surgieron los primeros mamíferos. Sobre la tierra, las plantas dominantes incluían los licofitos, las cicadáceas y los glosopteridios.

• **Período Jurásico:** Este período corresponde a la segunda parte de la era Mesozoica, y abarca desde el final del período Triásico hasta el comienzo del período Cretácico (206 - 145 millones de años). Se estima que a principios del Jurásico, el supercontinente Pangea se rompió (ver figura 2.6), dando lugar a otros dos grandes continente: Laurasia al norte y Gondwana al sur.



Figura 2.6: A principios del Jurásico se dividió Pangea, dando origen a dos grandes continentes: Laurasia y Gondwana.

Sin evidencias de glaciaciones, el clima de este período era cálido. No hay registro de la presencia de casquete polares. Se presume que las estrictas condiciones del Triásico cambiaron poco a poco, el clima cálido y húmedo permitió que el paisaje se llenara de junglas. Las coníferas siguieron dominando la flora, las cicadáceas eran también comunes, y los helechos abundaban en los bosques. Se presume
que durante el Jurásico, las formas de vida que poblaban los mares eran peces y reptiles, incluyendo ictiosaurios, plesiosaurios y cocodrilos marinos. Se dice que este período fue "la edad de oro" de los dinosaurios, en particular, de los grandes saurópodos y sus predadores.

• Transición Triásico - Jurásico (T/J): Es considerada como una de las más grandes y más enigmáticas en la historia de La Tierra, ya que afectó profundamente la vida en la superficie de la tierra y en los océanos. Desaparecieron los grandes anfibios y varias familias biológicas marinas, y permitió que los dinosaurios asumieran el papel dominante en el período Jurásico subsiguiente.

2.2. Método computacional: Sistemas Neuro Difusos

Para intentar establecer una relación matemática entre las variaciones isotópicas del carbono ($\delta^{13}C_{org}, \delta^{13}C_{carb}$) y del oxígeno ($\delta^{18}O$), se utilizará el módulo ANFIS (Adaptative Neuro Fuzzy Inference System) de MatLab, el cual es un sistema de inferencia que utiliza dos técnicas de inteligencia artificial: lógica difusa y redes neuronales (SND). En esta sección se realizará una explicación acerca de cada algoritmo, así como de uno de los posibles híbridos entre ambas técnicas.

2.2.1. Lógica Difusa

La técnica de lógica difusa ha cobrado una gran fuerza en los últimos años, debido a la potencialidad de sus aplicaiones, las cuales van desde el control de complejos procesos industriales, hasta el diseño de dispositivos artificiales de deducción automática. La lógica difusa es una metodología que proporciona una manera simple y elegante de obtener una conclusión a partir de información de entrada "ambigua", intentando imitar el como una persona toma decisiones basadas en ciertos tipos de características. A diferencia de la teoría de la lógica clásica o booleana, la cual describe la pertenencia $\mu_c(x)$ o no de un elemento x en un conjunto clásico C:

$$\mu_c(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in \mathcal{C} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

2.2.1.1. Fundamentos de la Lógica Difusa

• Conjuntos Difusos: Un conjunto difuso es una colección de objetos denominado universo del discurso, que representa una clase o concepto y queda caracterizado por una función de pertenencia o inclusión, que toma valores en el intervalo [0,1] y asigna a cada objeto un valor de ese intervalo, es decir, un grado de pertenencia al conjunto difuso. De esta manera, los conjuntos difusos pueden ser considerados como una generalización de los conjuntos clásicos.



Figura 2.7: Conjuntos lógicos, visión de la lógica difusa y visión de la lógica clásica.

• Funciones de Pertenencia: La función de pertenencia o función de membresía $(\mu(x))$ es una curva que define cómo a cada punto en el espacio de entrada le es asignado un valor de membresía (o grado de pertenencia) entre [0,1]. Hay diversas funciones que se utilizan como función de pertenencia, las más utilizadas se muestran en la figura 2.8 y que seguidamente detallaremos.



Figura 2.8: Tipos de funciones de pertencia (membership function, mf). (a)triangular (b)trapezoidal (c)campana generalizada (d)gauseana (e)gauseana de dos caras $(f)\pi$ (g)diferencia sigmoidal (h)producto sigmoidal.

A continuación se describen las funciones de pertenencia que se utilizarán en este estudio:

a) Función de pertenencia triangular (trimf): Es adecuada para modelar propiedades con un valor de inclusión distinto de cero, para un rango de valores estrecho entorno a un punto b. Está definido por tres parámetros:
a, b y c. La expresión característica sería:

$$tri(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & x \le a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \le x \le b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \le x \le c \\ 0 & c \le x \end{cases}$$

b) Función de pertenencia trapezoidal (trapmf): Resulta adecuada para modelar propiedades que comprenden un rango de valores. Está definida por cuatro parámetros: a, b, c y d; viene dada por:

$$trap(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & x \le a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \le x \le b \\ 1 & b \le x \le c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \le x \le d \\ 0 & d \le x \end{cases}$$

c) Función de pertenencia campana generalizada (gbellmf): Está representada por la función campana generalizada y está definida por tres parámetros: a, b y c.

$$gbell(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + |\frac{x - c}{a}|^{2b}}$$

d) Función de pertenencia gaussiana (gaussmf): Está representada por la función gaussiana generalizada, que depende de dos parámetros σ y c.

$$gauss(x;\sigma,c) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}$$

e) Función de pertenencia gaussiana de dos caras (gauss2mf): Se representa por la misma expresión que la función de pertenencia gaussiana generalizada.

$$gauss(x;\sigma_1, c_1, \sigma_2, c_2) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - c_{1,2}}{\sigma_{1,2}}\right)^2}$$

La primera función, definida por σ_1 y c_1 , determina la forma del lado izquierdo de la curva. La segunda función, definida por σ_2 y c_2 determina la forma del lado derecho de la curva. Siendo siempre $c_1 < c_2$.

f) Función de pertenencia π (pimf): Tiene forma de campana y resulta adecuada para conjuntos definidos en torno a un valor. Viene dada por:

$$\pi(x;c,l) = \begin{cases} S\left(x;c-\lambda,c-\frac{\lambda}{2},c\right), & x \le c\\ 1-S\left(x;c,c+\frac{\lambda}{2},c+\lambda\right), & x \ge c \end{cases}$$

g) Función de pertenencia diferencia sigmoidal (dsigmf): Viene dada por la suma de funciones sigmoidales. Esta función depende de los parámetros a y c; y viene dada por:

$$dsig(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$$

- h) Función de pertenencia producto sigmoidal (psigmf): Viene dada por la multiplicación de dos funciones sigmoidales, cada una de las cuales se representan por la última expresión mostrada, pero con valores distintos de sus parámetros característicos.
- **Reglas Difusas:** Las reglas difusas son un conjunto de proposiciones del tipo SI-ENTONCES que modelan el problema que se quiere resolver, una regla difusa asume la forma:

Regla 1: SI x_1 es a A_1 e y_1 es a B_1 , entonces $f_1 = ax_1 + by_1 + c$ Regla 2: SI x_2 es a A_2 e y_2 es a B_2 , entonces $f_2 = ax_2 + by_2 + c$ donde A y B son conjuntos difusos definidos en los rangos de x e y respectivamente. Existen dos tipos de formato para las reglas difusas:

- Modelo Mamdani: Tanto el antecedente como el consecuente de la regla son conjuntos difusos.
- Modelo Takagi-Sugeno: Es un modelo difuso que se centra en la precisión. El consecuente de la regla es una función de salida, combinación lineal de las variables de entrada o una constante.

2.2.2. Redes Neuronales Artificiales

Las redes neuronales artificiales están constituidas por elementos que se comportan de forma similar a la neurona biológica en sus funciones más comunes. Las neuronas biológicas (figura 2.9) se caracterizan por su capacidad de comunicarse. Las dendritas y el cuerpo celular de la neurona reciben señales de entrada excitatorias e inhibitorias de las neuronas vecinas; el cuerpo celular las combina e integra y emite señales de salida. El axón transporta esas señales a los terminales axónicos que se encargan de distribuir información a un nuevo conjunto de neuronas. Por lo general una neurona recibe información de miles de otras neuronas y, a su vez, envía información a miles de neuronas más.



Figura 2.9: Estructura general de una neurona biológica.

Por su parte, la neurona artificial pretende mimetizar las características más importantes de la neurona biológica. A continuación se describen, de forma general, los elementos que componen una neurona artificial como la que se muestra en la figura 2.10.



Figura 2.10: Funcionamiento general de una neurona artificial.

- Entradas: La entrada de información a una neurona puede ser proveniente del exterior o de otras neuronas artificiales vecinas.
- Peso sináptico (W_i) : Son los pesos con los que se ponderan los valores de entrada a la red, estos valores pueden ser positivos, negativos o cero. Si el peso sináptico es positivo, actúa como excitador, si es negativo como inhibidor y si es igual a cero, no existe conexión entre las neuronas. Mediante el ajuste de los pesos sinápticos, la red es capaz de adaptarse a cualquier entorno y realizar una determinada tarea.
- Función de propagación: Calcula el valor de base o entrada total a la unidad, generalmente como simple suma ponderada de todas las entradas recibidas, es decir, de las entradas multilicadas por el peso o valor de las conexiones. Equivale a la combinación se las señales excitatorias o inhibitorias de las neuronas biológicas.
- Función de activación: Se encarga de calcular el nivel o estado de activación de la neurona en función de la entrada total. Se usan diferentes tipos de funciones, desde simples funciones hasta funciones no lineales.

• Función de salida: Nos da la salida, generalmente la función utilizada es la identidad, es decir, la salida será el grado de activación.

2.2.3. Sistema de inferencia difusa, ANFIS (Adaptative Neuro Fuzzy Inference System)

En el contexto de este trabajo, resulta de especial importancia el estudio del sistema de inferencia neuro difuso ANFIS (Adaptative Neuro Fuzzy Inference System). Un modelo ANFIS es un modelo híbrido adaptativo donde las reglas se aplican siguiendo una estructura del tipo red neuronal con parámetros difusos. Debido a su gran adaptabilidad, estas redes pueden ser aplicadas en una gran cantidad de áreas.

2.2.3.1. Arquitectura de ANFIS

El sistema de inferencia se representa por medio de una red neural híbrida adaptable con 5 capas, donde cada capa representa una operación del mecanismo de inferencia difuso. Los nodos representados en cuadrados son adaptables, es decir, sus parámetros son ajustables; y los nodos representados en óvalos realizan operaciones matemáticas fijas. A continuación se definen cada una de las capas del sistema ANFIS:



Figura 2.11: Arquitectura ANFIS.

- Capa 1: Las entradas se corresponden a x e y. La salida del nodo es el grado de pertenencia para el que la variable de entrada satisface el término asociado a este nodo. Esta es una de las capas con parámetros ajustables, que corresponden con las funciones de pertenencia de las entradas y el número de reglas utilizadas. Las funciones de pertenencia pueden ser cualquiera de las discutidas anteriormente.
- Capa 2: Cada nodo calcula el grado de activación de su regla asociada. Ambos nodos están representados con una T, debido a que pueden representar cualquier t-norma para modelar la operación lógica AND.
- Capa 3: Cada nodo en esta capa está representado por una N, para indicar la normalización de los grados de activación. La salida del nodo es el grado de activación normalizado de la regla i, con respecto a la suma de los grados de activación.
- Capa 4: La salida de los nodos corresponde al producto entre el grado de activación normalizado por la salida individual de cada regla.

• Capa 5: Tiene un único nodo que calcula la salida total del sistema como la suma de sus entradas individuales.

CAPÍTULO 3

_MARCO GEOLÓGICO

Los datos de los parámetros analizados en el presente trabajo provienen de los Alpes sur-occidentales al norte de Italia (Alpes de Bérgamo). Se cuentan con datos de dos pozos: sección cantera Italcementi y sección Iseo, separados entre sí una distancia aproximada de 45 Km. (ver figura 3.1). Específicamente el análisis geológico está enfocado en los períodos Triásico tardío (Rhaetian) y el Jurásico temprano (Hettangian).

Como puede verse en la figura 3.1 (C), en este análisis, para el Triásico tardío y el Jurásico temprano, fueron seleccionadas cinco secciones de carbonatos marinos someros en los Alpes de Bérgamo (al norte de Italia). La sección Rhaetian está constituida por un grupo de limolitas Zu (subdividido en Zu-2 y Zu-3); la sección Hettangian está constituida por el grupo de limolitas Zu-4, dolomita Conchodon y por caliza Sedrina.



Figura 3.1: Ubicación de las secciones T/J. (A) Locación geográfica de los Alpes Bérgamo: (1)cantera Italcementi y (5)Iseo. (B) paleoprofundidades interpretadas y posición lo largo de la rampa de carbonato. (C) Esquema estratigráfico del límite T/J en los Alpes de Bérgamo. (D) Reconstrucción de la paleografía del período Jurásico temprano.

Los sedimentos estudiados se depositaron en una rampa de carbonato con profundidad monoclinal orientada hacia el este, desde el Monte Albenza hasta las áreas del lago Iseo. La sección Iseo se depositó en la parte distal de esa rampa de carbonato, mientras que la sección de la cantera Italcementi (ubicada en el área del Monte Albenza) representa un ambiente deposicional más proximal.



Figura 3.2: Columnas estratigráficas correspondientes a las secciones cantera Italcementi e Iseo y correlación de las secciones T/J.

El período Triásico tardío está compuesto por packstones y grainstones conformados por ooides y oncoides ricos en fauna y microflora fosilizada. Los foraminíferos bentónicos están dominados por *Triasina Hantkeni* [21] que se asocian con corales, esponjas calcáreas, organismos incrustados y megalodontis. El miembro superior Zu-3 representa la porción regresiva del Triásico tardío. Está marcado por una paraconformidad que puede considerarse como una discordancia de ahogamiento regional [22].

De mayor interés para este estudio es la formación caliza superior (miembro Zu-4), que consiste en calizas micríticas en capas muy delgadas que van de gris a gris oscuro, con intercalaciones margosas que disminuyen hacia arriba, depositadas durante el inicio de la transgresión en el Jurásico temprano. Con espesores variables, el miembro Zu-4, forma una unidad de marca estratigráfica, que separa los carbonatos de aguas someras del Triásico tardío y del Jurásico temprano. Se pueden identificar dos asociaciones de litofacies diferentes en el miembro Zu-4 [11]:

- Un horizonte limo margoso caracteriza la base del miembro Zu-4 (ver figura 3.3).
 En el área occidental del Monte Albenza (sección de la cantera Italcementi), este horizonte no está presente y lo reemplaza un horizonte condensado rico en hierro. Al horizonte basal del Zu-4 le siguen las lutitas calcáreas y calizas lodosas. Las superficies de las horizontes están frecuentemente bioturbadas con delgadas intercalaciones de packstones intraclásticos-peloidales.
- La parte superior se diferencia de la subyacente por el incremento hacia arriba de calcarenitas que consisten de packstones bioclástico.



Figura 3.3: (A) Contacto de los miembros Zu-3/Zu-4 en la sección Iseo. (B) Esquema de la sucesión estratigráfica de límite T/J al oeste del Monte Albenza, se puede observar paraconformidad con un estrecho suelo duro de hierro.

El análisis de macrofacies y microfacies del miembro Zu-4 [19] no reveló ningún fósil útil para la correlación bioestratigráfica. Los foraminíferos bentónicos, abundantes en la formación del miembro de caliza Zu-3 desaparecen abruptamente hacia el tope, así como las comunidades de coral que están también involucradas en la extinción de finales del período Triásico. La desaparición del Taxón Triásico marino podría reflejar un cambio de facies regional, desencadenado por la caída del nivel del mar a finales del período Triásico; sin embargo, no se han encontrado foraminíferos bentónicos significativos en los sedimentos de la plataforma suprayacente de dolomitas de Conchodon [4].

En una investigación palinológica de los sedimentos del Triásico superior y del Jurásico inferior en los Alpes de Bérgamo, se ubicó el límite palinológico T/J en la sucesión baja de lutitas Zu-4. La desaparición de organismos marinos en la parte superior del miembro Zu-3 precede el cambio en los conjuntos palinológicos. La dolomita Conchodon está cubierta por un sistema deposicional de plataforma abierta. La caliza Sedrina está constituida por calizas ooidales y por calizas margosas y se encuentra por encima de la dolomita Conchodon [19].

capítulo 4

METODOLOGÍA

En este capítulo se expone la metodología aplicada para la elaboración de este trabajo. Los parámetros que se han considerado son: isótopo de carbono 13 proveniente de muestras orgánicas ($\delta^{13}C_{org}$), isótopo de carbono 13 proveniente de carbonatos ($\delta^{13}C_{carb}$) y el isótopo de oxígeno 18 ($\delta^{18}O$), todos correlacionados a profundidad. Los datos utilizados provienen de dos secciones: sección cantera Italcementi y sección Iseo, ambas ubicadas en los Alpes Sur-Occidentales al norte de Italia (Alpes de Bérgamo).

Para este trabajo, fue necesario cumplir básicamente cuatro etapas, las cuales se esquematizan en la figura 4.1. La primera etapa consiste en la digitalización de la data a utilizar. En la segunda, se realizó una evaluación, utilizando regresión lineal, entre (A) $\delta^{18}O$ y el $\delta^{13}C_{org}$, (B) $\delta^{18}O$ y el $\delta^{13}C_{carb}$ y (C) $\delta^{13}C_{org}$ y el $\delta^{13}C_{carb}$, para determinar si guardan entre sí una relación del tipo lineal. Luego, se entrenó el SND, utilizando el $\delta^{13}C_{org}$ ó el $\delta^{13}C_{carb}$, y el valor de $\delta^{18}O$ como dato de entrada, obteniéndose ecuaciones de inferencia pertenencientes a cada una de las dos secciones estudiadas. Finalmente se evaluaron las ecuaciones obtenidas con el SND y se compararon con el valor real de $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$.



Figura 4.1: Etapas de la metodología, necesarias para la obtención de las ecuaciones de inferencia para datos con comportamiento no lineal.

4.1. Digitalización de los datos

En principio se contaba con los datos de forma impresa, por lo que fue necesario digitalizarlos (llevarlos a una hoja de cálculo). Para esto se utilizó el software disponible en la web: DigitalizeIt. Los datos utilizados para la elaboración de este trabajo se encuentran divididos en dos secciones: sección cantera Italcementi y sección Iseo, separadas entre sí una distancia aproximada de 45 Kilómetros.

Para el procesamiento, es necesario introducir en el software tanto la ubicación como el valor de $x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}$, una vez definidos estos valores, se procede a seleccionar, a lo largo del perfil, punto a punto, los valores a digitalizar. Estos se irán mostrando en la columna ubicada en el extremo derecho de la pantalla.



Figura 4.2: Interfaz gráfica del software DigitalizeIt (disponible en la web).

Como los datos se digitalizán punto a punto, la precisión del operador del software es fundamental, ya que, la mal escogencia de un valor a lo largo del perfil acarreará errores el las siguientes etapas del procesamiento. Tambiés es de importancia, al momento de escoger punto a punto los valores a digitalizar, conservar la correlación a profundidad entre todos los valores involucrados.

4.2. Análisis de linealidad entre los isótopos

En esta sección se verifica la posible existencia de relaciones lineales entre los parámetros a ser usados, es decir, hay que comprobar si existe o no una relación lineal entre los parámetros comprometidos: $\delta^{13}C_{org}$, $\delta^{13}C_{carb}$ y $\delta^{18}O$. En caso de que existan relaciones lineales entre ellos, habrá que analizar la pertinencia del uso de ANFIS en dicho caso. En caso de obtener linealidad entre los isótopos de carbono, el trabajo se reduce al estudio de sólo uno de ellos.

Es importante destacar, que generalmente, para este tipo de estudios, se suele realizar un análisis de los datos utilizando logaritmos, para verificar si los parámetros guardan entre ellos una dependencia de tipo potencial. En nuestro caso ese análisis no se realizó debido a que el $\delta^{18}O$ y el $\delta^{13}C_{org}$ tienen valores negativos, y el logaritmo de un número negativo no existe.

4.3. Análisis no-lineal de los datos usando un Sistema Neuro Difuso (SND)

Esta sección está constituida en 3 etapas: la primera corresponde a determinar el número de reglas difusas y funciones de membresía, luego, en la segunda etapa se realiza la definición de las ecuaciones de inferencia del SND y finalmente, se efectúa la evaluación a profundidad de dichas ecuaciones de inferencia.

4.3.1. Determinación del número de reglas difusas y funciones de membresía

Para poder determinar las funciones de inferencia más adecuadas para relacionar las variaciones isotópicas de interés, es necesario determinar la función de membresía que mejor se adapte al tipo de datos utilizados, a fin de realizar una adecuada inferencia. Entre las funciones de membresía más utilizadas, se encuentran: triangular (trimf), trapezoidal (trapmf), campana generalizada (gbellmf), gausseana (gaussmf), gausseana de dos caras (gauss2mf), pi (pimf), producto sigmoidal (psigmf) y diferencia sigmoidal (dsigmf).

Otro factor importante a determinar en esta sección es el número de reglas difusas con las que se va a tratar a cada par de conjunto de datos. Se realizaron pruebas variando entre 2 (mínimo permitido por el programa) a 3 reglas difusas. En la figura 4.3 se muestra la ventana del módulo de ANFIS en MatLab, a la cual se puede ingresar con el comando *anfisedit* en MatLab:



Figura 4.3: Interfaz gráfica del módulo de ANFIS en MatLab (desde la línea de comando: anfisedit).

Para el entrenamiento del SND, se alimentó la red con dos combinaciones de valores de entrada: (A) $\delta^{13}C_{org}$ - $\delta^{18}O$ y (B) $\delta^{13}C_{carb}$ - $\delta^{18}O$.

En este trabajo, utilizamos los siguientes parámetros para el manejo del módulo de ANFIS:

• Sección "Load Data": Este módulo permite cargar lo datos para el entrenamiento (training). Se debe indicar, en nuestro caso, que los datos provienen del espacio de trabajo de MatLab.

- Sección: "Generate Fis": En esta ventana se crea la estructura de inferencia difusa. Nuestra estructura de inferencia se creará utilizando *grid partition*, que divide los datos de acuerdo al número de reglas difusas que establezcamos, y permite definir la estructura mediante la elección de las funciones de pertenencia y el tipo de salida (lineal).
- Sección "Train FIS": El método de optimización utilizado será el híbrido, el cual utiliza retropropagación para los parámetros asociados con las funciones de pertenencia de las entradas y mínimos cuadrados para las funciones de membresía de la salida. El valor de tolerancia escogido fue 0 en cada entrenamiento. El número de iteraciones requeridas, dependerá de los parámetros escogidos en cada entrenamiento y del tipo de datos.

En el recuadro inferior, el programa muestra el valor del error cuadrático medio (RMSE) calculado por el SND utilizando los datos reales y los valores inferidos en cada iteración. Dicho valor de RMSE es calculado según:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i}^{N}(x_{real} - x_{inf})^2}$$

Las tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 indican el valor obtenido de error cuadrático medio, correspondiente a cada función de membresía, con 2 y 3 reglas difusas (generadas por el programa), para cada sección de estudio.

Función de membresía / Reglas	2	3
trimf	0,65	0,64
trapmf	0,66	0,64
gbellmf	0,64	0,59
gaussmf	0,64	0,64
gauss2mf	0,64	0,64
pimf	0,64	0,63
dsigmf	0,63	0,64
psigmf	0,63	0,64

Tabla 4.1: Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{18}O$, al combinar las diferentes funciones de membresía, usando 2 y 3 reglas difusas. Sección Iseo.

Función de membresía / Reglas	2	3
trimf	0,80	0,67
trapmf	0,60	0,61
gbellmf	0,62	0,59
gaussmf	0,62	0,60
gauss2mf	0,61	0,60
pimf	0,61	0,59
dsigmf	0,61	0,60
psigmf	0,61	0,60

Tabla 4.2: Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{13}C_{carb}$ y $\delta^{18}O$, al combinar las diferentes funciones de membresía, usando 2 y 3 reglas difusas. Sección Iseo.

Función de membresía / Reglas	2	3
trimf	0,54	0,54
trapmf	0,54	0,53
gbellmf	0,54	0,50
gaussmf	0,54	0,51
gauss2mf	0,54	0,52
pimf	0,54	0,53
dsigmf	0,54	0,53
psigmf	0,54	0,53

Tabla 4.3: Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{18}O$, al combinar las diferentes funciones de membresía, usando 2 y 3 reglas difusas. Sección cantera Italcementi.

Función de membresía / Reglas	2	3
trimf	0,60	0,58
trapmf	0,58	$0,\!59$
gbellmf	0,60	$0,\!56$
gaussmf	0,60	0,53
gauss2mf	0,58	$0,\!56$
pimf	0,57	$0,\!51$
dsigmf	0,58	0,55
psigmf	0,58	0,55

Tabla 4.4: Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{13}C_{carb}$ y $\delta^{18}O$, al combinar las diferentes funciones de membresía, usando 2 y 3 reglas difusas. Sección cantera Italcementi.

Las gráficas a profundidad para cada función con 2 y 3 reglas difusas obtenidas son mostradas en el Apéndice B. Tomando en cuenta dichos resultados, y haciendo

un análisis cualitativo y cuantitativo se pudo determinar la función de membresía y el número de reglas difusas que mejor se adapta al conjunto de datos estudiados.

4.3.2. Definición de las ecuaciones de inferencia del SND

En esta etapa se definen las ecuaciones de inferencia. La porción de datos que se suele utilizar para realizar el entrenamiento del SND, varía de acuerdo con el tipo y cantidad de datos con los que se cuente. En este caso se utilizó un 50% de pares de datos a la vez. Para realizar esta selección de datos se corrió un código sencillo en la plataforma de cálculo de MatLab, el cual se muestra en la figura 4.4

```
out2=randperm(78)';
2 -
     _ for i=1:39
3 -
            j=out2(i)
4 -
            a(j, 1:2)=ital_carb2(j,1:2);
5 -
            al=sortrows(a);
6 -
      <sup>L</sup> end
7 -
     _ for h=i+1:78
8 -
            z(h-39, 1:2)=a1(h,1:2);
        end
```

Figura 4.4: Código utilizado en Matlab para la escogencia aleatoria del 50% de los datos a profundidad utilizados en el entrenamiento.

Para definir las ecuaciones de inferencia, el SND es entrenado con el 50 % de la totalidad de los datos, tanto de $\delta^{13}C_{org}$ como de $\delta^{13}C_{carb}$. Una vez realizado el entrenamiento (explicado en la sección 4.3.1), se obtendrá un archivo de extensión .fis, el cual contiene información referente al: rango de los valores, tanto de entrada como de salida, tipo de función de membresía y el número de reglas difusas utilizadas durante el entrenamiento y los coeficientes de las ecuaciones de inferencia obtenidas. El número de reglas difusas aplicadas, es decir, si se aplican 3 reglas difusas, a la salida del SND se obtendrán 3 ecuaciones de inferencia, una para cada regla difusa.

4.3.3. Evaluación

Una vez obtenidas las ecuaciones de inferencia con el SND, se desean obtener los perfiles de $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$ inferidos. Para ello, se realiza una evaluación, evaluando las ecuaciones obtenidas con los valores de $\delta^{18}O$ a profundidad. Una vez obtenido el perfil inferido, se realiza el crossplot entre los valores de núcleo y los valores obtenidos al evaluar. Finalmente, es importante determinar el valor del coeficiente de correlación lineal (R^2) junto con la ecuación de la recta para así poder comparar estos resultados con los obtenidos al realizar la evaluación con regresión lineal.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en la etapa de procesamiento de los datos, utilizando valores de entrada de:

- (a) Variación isotópica de carbono orgánico $(\delta^{13}C_{org})$ y variación isotópica del oxígeno $(\delta^{18}O)$.
- (b) Variación isotópica de carbono en carbonatos $(\delta^{13}C_{carb})$ y variación isotópica del oxígeno $(\delta^{18}O)$.

Los datos utilizados provienen de los Alpes sur occidentales al norte de Italia (Alpes de Bérgamo); para este estudio se contó con datos de dos secciones: sección Iseo y sección cantera Italcementi, separadas entre sí aproximadamente 45 Km. La sección Iseo, cuenta con datos a profundidad de aproximadamente de 45 m; y la sección cantera Italcementi cuenta con datos a profundidad de aproximadamente 35 m.

5.1. Relación lineal entre los Isótopos

Para estudiar la correlación lineal entre $\delta^{13}C_{org}$ ó $\delta^{13}C_{carb}$ con $\delta^{18}O$ utilizando el método de regresión lineal convencional, fue utilizado el programa **Excel**. En las figuras 5.1 y 5.2 se muestran los resultados obtenidos, tanto para la sección Iseo como para la sección cantera Italcementi, donde se observa la poca linealidad entre los isótopos $\delta^{13}C_{carb}$ y $\delta^{18}O$, al igual que para los isótopos $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{18}O$.



Figura 5.1: Análisis de: (a) $\delta^{13}C_{carb}$ v
s $\delta^{18}O$ y (b) $\delta^{13}C_{org}$ v
s $\delta^{18}O$. Correspondientes a la seccón Iseo.

Ecuación característica (RL)	R^2_{RL}
$\delta^{13}C_{org} = -0,32\delta^{18}O - 29,45$	0,22
$\delta^{13}C_{carb} = 0,03\delta^{18}O + 2,91$	0,00
$\delta^{13}C_{org} = -0,09\delta^{13}C_{carb} - 22,74$	0,01
$\delta^{13}C_{carb} = -0,08\delta^{13}C_{org} + 0,60$	0,01

Tabla 5.1: Ecuaciones características y valores de R^2 de las gráficas crossplot entre $\delta^{18}O, \, \delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$. Pertenecientes a la sección Iseo.



Figura 5.2: Análisis de: (a) $\delta^{13}C_{carb}$ vs $\delta^{18}O$ y (b) $\delta^{13}C_{org}$ vs $\delta^{18}O$. Correspondientes a la seccón cantera Italcementi.

Ecuación característica (RL)	R_{RL}^2
$\delta^{13}C_{org} = -0,17\delta^{18}O - 26,70$	0,03
$\delta^{13}C_{carb} = 0,13\delta^{18}O + 3,50$	0,04
$\delta^{13}C_{org} = -0,29\delta^{13}C_{carb} - 25,50$	0,08
$\delta^{13}C_{carb} = -0,29\delta^{13}C_{org} - 4,39$	0,08

Tabla 5.2: Ecuaciones características y valores de R^2 de las gráficas crossplot entre $\delta^{18}O, \, \delta^{13}C_{org} \ge \delta^{13}C_{carb}$. Pertenecientes a la sección cantera Italcementi.

Una vez obtenidas, aplicando regresión lineal, el conjunto de ecuaciones características, fue posible evaluarlas con los valores de $\delta^{18}O$ a profundidad, y así obtener los perfiles correspondientes a los valores de $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$, tanto para la sección Iseo como para la sección cantera Italcementi. En las figuras 5.3 y 5.4 pueden observarse dichos perfiles.



Figura 5.3: Perfiles: (A) $\delta^{13}C_{carb}$ y (B) $\delta^{13}C_{org}$ en la sección Iseo. Los valores con símbolo relleno representan los valores de núcleo y en símbolo sin relleno los valores calculados utilizando regresión lineal. La línea sombreada representa la transición T/J.



Figura 5.4: Perfiles: (A) $\delta^{13}C_{carb}$ y (B) $\delta^{13}C_{org}$ en la sección cantera Italcementi. Los valores con símbolo relleno representan los valores de núcleo y en símbolo sin relleno los valores calculados utilizando regresión lineal. La línea sombreada representa la transición T/J.

En los cuatro casos la correlación lineal obtenida (R^2) mediante el uso de métodos convencionales sencillos, la consideramos muy baja, lo cual justifica la evaluación no lineal de los datos, por lo que decidimos utilizar un Sistema Neuro Difuso, a fin de intentar vincular matemáticamente las variaciones isotópicas estudiadas y de esta manera intentar establecer una relación matemática entre los cambios paleoclimáticos y los tipos de vegetación. A pesar de que no es el tipo de alimentación lo que influye en las variaciones climáticas, también fue realizado un análisis lineal del $\delta^{18}O$ en función de $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$, el cual puede verse en el apéndice C.

5.2. Análisis no-lineal de los datos usando un Sistema Neuro Difuso (SND)

Después de comprobar, como se muestra en la sección anterior, que no existe una relación lineal matemática sencilla entre los isótopos de $\delta^{13}C_{org}$ ó $\delta^{13}C_{carb}$ con $\delta^{18}O$, se decidió recurrir a una herramienta de cálculo más poderosa, en este caso, el sistema híbrido de inferencia neuro difusa (ANFIS de la plataforma de cálculo Matlab), la cual nos permite realizar un análisis no lineal de los datos en estudio, así como la posibilidad de establecer una relación matemámtica entre ellos.

5.2.1. Número de reglas difusas y funciones de membresía

Para lograr los objetivos planteados, se entrenó al SND con las combinaciones de isótopos de entrada de $\delta^{13}C_{org}$ con $\delta^{18}O$, y $\delta^{13}C_{carb}$ con $\delta^{18}O$. La primera parte del análisis no lineal consistió en establecer cuál función de membresía y cuántas reglas difusas se adaptaban mejor a cada conjunto de datos en cada una de las dos secciones estudiadas: la sección Iseo y la sección cantera Italcementi. A continuación se muestra gráficamente el resultado obtenido, al realizar las diferentes pruebas, para determinar cuantas reglas difusas y cuál función de membresía se adaptaba mejor.



Figura 5.5: Error cuadrático medio de la sección Iseo:(A) $\delta^{13}C_{org}$ y (B) $\delta^{13}C_{carb}$ y de la seción cantera Italcementi: (C) $\delta^{13}C_{org}$ y (D) $\delta^{13}C_{carb}$ para cada función de membresía usando: 2 (rombo) y 3 (cuadrado) reglas difusas.

Haciendo un análisis cuantitativo y cualitativo de los resultados mostrados en la figura 5.5 y apéndice B, respectivamente, decidimos utilizar los parámetros mostrados en las tablas 5.3 5.4, correspondientes a las secciones Iseo y cantera Italcementi.

Variables	Función de membresía	Reglas difusas
$\begin{tabular}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	campana generalizada (gbell)	3
$\left[\left(\ \delta^{18}O \ , \ \delta^{13}C_{carb} \ \right) \right]$	gausseana (gauss)	3

Tabla 5.3: Parámetros escogidos para realizar la inferencia. Correspondientes a la sección Iseo.

Variables	Función de membresía	Reglas difusas
$\begin{tabular}{c} (\ \delta^{18}O\ ,\ \delta^{13}C_{org}\) \end{tabular}$	campana generalizada (gbell)	3
$\left[\left(\ \delta^{18}O \ , \ \delta^{13}C_{carb} \ \right) \right.$	π (pi)	3

Tabla 5.4: Parámetros escogidos para realizar la inferencia. Correspondientes a la sección cantera Italcementi.

5.2.2. Ecuaciones de inferencia no lineales

Como se ha descrito anteriormente, el proceso de inferencia de ecuaciones no lineales que establezcan una relación matemática entre $\delta^{13}C_{org}$ ó $\delta^{13}C_{org}$ con el $\delta^{18}O$, fue realizada utilizando la técnica computacional de sistemas neuro-difusos (SND). La obtención de dichas ecuaciones no lineales vincularía matemáticamente a los cambios en el clima con los cambios en la vegetación, tipo de alimentación y hábitat, específicamente haciendo referencia a la extinción masiva ocurrida en la transición Triásico / Jurásico. A continuación se muestran los resultados obtenidos en dicho proceso de inferencia.

5.2.2.1. Sección Iseo

Se realizó la inferencia de los isótopos $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$ utilizando el Sistema Neuro-Difuso (SND) en la sección Iseo. Los datos provienen de los Alpes suroccidentales al norte de Italia (Alpes de Bérgamo) y tienen una profundidad aproximada de 45m.

Inferencia del isótopo $\delta^{13}C_{org}$

La red se entrenó utilizando $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{18}O$ como valores de entrada, la función de membresía campana generalizada y 3 reglas difusas. En la figura 5.6 se muestran los perfiles a profundidad del $\delta^{13}C_{org}$ tanto real (línea continua) como inferido (línea punteada) y el crossplot entre ellos ($\delta^{13}C_{org}$ de núcleo vs $\delta^{13}C_{org}$ inferido).

Los perfiles de $\delta^{13}C_{org}$ tanto real como el inferido muestran una anomalía que marca la transición T/J (resaltada por una línea horizontal, a los 14m de profundidad). De igual manera, el perfil obtenido a través del $\delta^{13}C_{org}$ inferido conserva la forma del perfil con los valores reales de núcleo.

El coeficiente de correlación lineal (R^2) calculado, realizando el crossplot entre los valores reales y los inferidos, es de 42 %, lo que muestra que la aplicación del SND mejora la inferencia de $\delta^{13}C_{org}$ en comparación a los resultados obtenidos con regresión lineal.


Figura 5.6: Perfiles de $\delta^{13}C_{org}$ en la sección Iseo: (A) $\delta^{13}C_{org}$ medido y (B) $\delta^{13}C_{org}$ inferido. La línea sombreada representa la transición T/J. (C) Crossplot $\delta^{13}C_{org}$ de núcleo vs $\delta^{13}C_{org}$ inferido.

Inferencia del isótopo $\delta^{13}C_{carb}$

La red se entrenó utilizando $\delta^{13}C_{carb}$ y $\delta^{18}O$ como valores de entrada, la función de membresía gausseana con 3 reglas difusas. En la figura 5.7 se muestran los perfiles a profundidad del $\delta^{13}C_{carb}$ tanto real (línea continua) como inferido (línea punteada) así como el crossplot entre ellos ($\delta^{13}C_{carb}$ de núcleo vs $\delta^{13}C_{carb}$ inferido).

Cualitativamente en la figura 5.7 podemos observar que la forma del perfil real se conserva; las anomalías más importantes son observables a lo largo de la curva, y en la transición T/J (resaltada por una línea horizontal) se distingue un pico importante, el cual sugiere un cambio considerable en la temperatura.

El coeficiente de correlación lineal (R^2) calculado realizando el crossplot entre los valores reales y los inferidos es de 32 %, la inferencia obtenida utilizando SND mejora significativamente con respecto a la técnica de regresión lineal.



Figura 5.7: Perfiles de $\delta^{13}C_{carb}$ en la sección Iseo: (A) $\delta^{13}C_{carb}$ medido y (B) $\delta^{13}C_{carb}$ inferido. La línea sombreada representa la transición T/J. (C) Crossplot $\delta^{13}C_{org}$ de núcleo vs $\delta^{13}C_{carb}$ inferido

5.2.2.2. Sección cantera Italcementi

Se realizó la inferencia utilizando el Sistema Neuro-Difuso (ANFIS) en la sección cantera Italcementi, los datos pertenecientes a esta sección tienen una profundidad aproximada de 35m. A continuación se muestran los resultados obtenidos, tanto en la inferencia del $\delta^{13}C_{org}$ como del $\delta^{13}C_{carb}$. Los siguientes resultados fueron procesados utilizando los parámetros descritos en la tabla 5.4.

Inferencia del isótopo $\delta^{13}C_{org}$

La red se entrenó utilizando $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{18}O$ como valores de entrada, la función de membresía campana generalizada y 3 reglas difusas. En la figura 5.8 se muestran los perfiles a profundidad del $\delta^{13}C_{org}$ tanto real (línea continua) como inferido (línea punteada) y el crossplot entre ellos ($\delta^{13}C_{org}$ de núcleo vs $\delta^{13}C_{org}$ inferido).

El perfil obtenido con los valores inferidos de $\delta^{13}C_{org}$ reproduce la transición T/J (resaltada por una línea horizontal) a una profundidad de 7 metros; también marca los descensos y ascensos más importantes de $\delta^{13}C_{org}$.

El coeficiente de correlación lineal (R^2) calculado realizando el crossplot entre los valores reales y los inferidos es de 12 %.



Figura 5.8: Perfiles de $\delta^{13}C_{org}$ en la sección cantera Italcementi: (A) $\delta^{13}C_{org}$ medido y (B) $\delta^{13}C_{org}$ inferido. La línea sombreada representa la transición T/J. (C) Crossplot $\delta^{13}C_{org}$ de núcleo vs $\delta^{13}C_{org}$ inferido

Inferencia del isótopo $\delta^{13}C_{carb}$

La red se entrenó utilizando $\delta^{13}C_{carb}$ y $\delta^{18}O$ como valores de entrada, la función de membresía π con 3 reglas difusas. En la figura 5.9 se muestran los perfiles a profundidad del $\delta^{13}C_{carb}$ tanto real (línea continua) como inferido (línea punteada) así como el crossplot entre ellos ($\delta^{13}C_{carb}$ de núcleo vs $\delta^{13}C_{carb}$ inferido).

En el perfil obtenido con los valores de $\delta^{13}C_{carb}$ inferidos (ver figura 5.9) se aprecian la mayoría de las anomalías existentes en el perfil de los valores medidos. A la profundidad de 7 metros, que es donde se encuentra la transición T/J, se puede apreciar que es recreado el cambio que sugiere cambio importante en la temperatura.

El coeficiente de correlación lineal (R^2) calculado realizando el crossplot entre los valores reales y los inferidos es de 29 %, lo que indica que al utilizar la técnica de SND es posible mejorar considerablemente la inferencia de los valores estudiados.



Figura 5.9: Perfiles de $\delta^{13}C_{carb}$ en la sección cantera Italcementi: (A) $\delta^{13}C_{carb}$ medido y (B) $\delta^{13}C_{carb}$ inferido. La línea sombreada representa la transición T/J. (C) Crossplot $\delta^{13}C_{org}$ de núcleo vs $\delta^{13}C_{carb}$ inferido

Una vez entrenada la red neuro-difusa, se finaliza el proceso de generación de ecuaciones de inferencia, y los resultados se guardan automáticamente en un archivo generado bajo la extensión ".fis", en el cual se almacena toda la información referente a la forma de las ecuaciones de inferencia, los rangos de los valores de entrada y salida de acuerdo a cada regla difusa y la función de membresía utilizada por el usuario en el entrenamiento del SND.

Finalmente, los resultados generados, tanto con regresión lineal, como con SND, se muestran en las tablas 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8, en base a los cuales podemos apreciar una mejoría considerable en todos los coeficientes de correlación lineal.

Técnica	Rango de entrada	Ecuación	Rango de salida	R^2
RL		$\delta^{13}C_{org} = -0,32\delta^{18}O - 29,45$		0,22
SND	$[(0,56\ 2,09)\ (-8,61)]$	$\delta^{13}C_{org} = -14,64\delta^{18}O - 145,23$		
	$[(1,41\ 2,31)\ (-5,51)]$	$\delta^{13}C_{org} = -0,43\delta^{18}O - 30,14$	[-29,10,-25,10]	0,42
	$[(0,06\ 2,29)\ (-3,60)]$	$\delta^{13}C_{org} = -34,54\delta^{18}O - 151,42$		

Tabla 5.5: Comparación entre RL y SND para la inferencia de $\delta^{13}C_{org}$. Sección Iseo.

Técnica	Rango de entrada	Ecuación	Rango de salida	R^2
RL		$\delta^{13}C_{carb} = 0,03\delta^{18}O + 2,91$		0,00
SND	[1,48 -8,03]	$\delta^{13}C_{carb} = 2,75\delta^{18}O + 25,57$		
	[0,91 - 5,48]	$\delta^{13}C_{carb} = 1,44\delta^{18}O + 8,03$	$[0, 46 \ 3, 93]$	0,32
	[0, 38 - 2, 40]	$\delta^{13}C_{carb} = 7,87\delta^{18}O + 23,59$		

Tabla 5.6: Comparación entre RL y SND para la inferencia de $\delta^{13}C_{carb}$. Sección Iseo.

Técnica	Rango de entrada	Ecuación	Rango de salida	R^2
RL		$\delta^{13}C_{org} = -0,17\delta^{18}O - 26,70$		0,03
SND	$[(1,54\ 1,60)\ (-4,90)]$	$\delta^{13}C_{org} = -41, 13\delta^{18}O - 235, 76$		
	$[(1,18\ 2,15)\ (-2,68)]$	$\delta^{13}C_{org} = -4,07\delta^{18}O - 17,84$	[-27, 30, -25, 60]	0,14
	$[(0,59\ 2,61)\ (-1,03)]$	$\delta^{13}C_{org} = 1,25\delta^{18}O - 19,89$		

Tabla 5.7: Comparación entre RL y SND para la inferencia de $\delta^{13}C_{org}$. Sección cantera Italcementi.

Técnica	Rango de entrada	Ecuación	Rango de salida	R^2
RL		$\delta^{13}C_{carb} = 0,13\delta^{18}O + 3,50$		0,04
SND	[(-6,61 - 5,72) (-4,39 - 3,51)]	$\delta^{13}C_{carb} = 3,13\delta^{18}O + 18,42$		
	[(-4,39 - 3,51) (-2,02 - 1,58)]	$\delta^{13}C_{carb} = 1,74\delta^{18}O + 6,56$	$[0, 46 \ 4, 07]$	0,29
	[(-3,29 - 3,27) (0,03 0,92)]	$\delta^{13}C_{carb} = -0,81\delta^{18}O + 2,25$		

Tabla 5.8: Comparación entre RL y SND para la inferencia de $\delta^{13}C_{carb}$. Sección cantera Italcementi.

Al observar las tablas 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8, podemos notar que la aplicación del Sistema Neuro Difuso mejoró considerablemente la inferencia en los valores de $\delta^{13}C_{org}$ y de $\delta^{13}C_{carb}$, además, cualitativamente siempre el SND pudo reproducir la anomalía de la transición Triásico/Jurásico, demostrando así que el hábitat y tipo de vegetación dependen de los cambios que puedan existir en el clima.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó la inferencia de la $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$ a partir de la $\delta^{18}O$, todos correlacionados a profundidad, mediante el uso del método computacional sistemas neuro difusos (SND). Las variaciones isotópicas utilizadas provienen de dos pozos, Iseo y cantera Italcementi, ubicados en los Alpes sur-occidentales al norte de Italia (Alpes de Bérgamo). Para construir las ecuaciones de inferencia, el SND fue entrenado con combinaciones entre las variaciones isotópicas: $\delta^{13}C_{org} - \delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{carb} - \delta^{18}O$. Las conclusiones mas relevantes obtenidas son:

- Hemos encontrado que las variaciones isotópicas en estudio: $\delta^{13}C_{org}$, $\delta^{13}C_{carb}$ y $\delta^{18}O$, no guardan una relación lineal entre ellas. Asociamos este hecho a la naturaleza intrínseca de estos isótopos.
- A través del SND logramos inferir los valores de $\delta^{13}C_{carb}$ en un 30%, tanto para la sección Iseo como Italcementi. El haber encontrado el mismo porcentaje de inferencia en ambas secciones nos resulta adecuado, a pesar de estar en zonas geográficamente diferentes, ya que, este tipo de isótopos se encuentra depositado en materiales inertes, por lo cual, factores como migraciones, alimentación, entre otros, no causan diferencias entre las deposiciones en ambas zonas.

- El porcentaje de inferencia para el $\delta^{13}C_{carb}$ no es muy alto, sin embargo, nos permitió, por primera vez, establecer una aproximación matemática entre $\delta^{13}C_{carb}$ y $\delta^{18}O$, independientemente de la zona.
- En el caso de la variación isotópica $\delta^{13}C_{org}$, hemos logrado, mediante el SND, una inferencia del 40 % para la sección Iseo (cercana al Lago Iseo), mientras que para la sección cantera Italcementi (zona montañosa), tan solo se pudo reproducir en un 15 %. Estimamos que estas diferencias se deben a la diversidad y cantidad de especies que habitaban en cada una de las zonas.
- Mediante las ecuaciones proporcionadas del entrenamiento del SND, logramos reproducir las anomalías de las variaciones isotópicas de $\delta^{13}C_{org}$, $\delta^{13}C_{carb}$ en función del $\delta^{18}O$.
- Finalmente logramos obtener ecuaciones que reproducen adecuadamente la variación isotópica del carbono (orgánico y carbonatado) alrededor de la zona de la transición T-J para la sección Iseo, como para la Cantera Italcementi.

Capítulo 6: Conclusiones

..

BIBLIOGRAFÍA

- Beerling, D. CO₂ and the end-Triassic mass extinction. Nature, 415 (2002), pp. 386-385.
- [2] Sepkoski J. Patterns of the Phanerozoic extinction: a perspective from global data bases. Walliser, O.H. Editions, Global Events and Event Stratigraphy in the Phanerozoic. Springer, Berlin (1996), pp. 35-51.
- [3] Tanner L., Lucas S., Chapman M. Assessing the record and causes of the Late Triassic extinctions. Earth-Science Reviews, 65 (2004), pp. 103-139.
- [4] Hallam A., Wignall P. Mass Extinction and sea-level changes. Earth-Science Reviews, 48 (1999), pp. 217-258.
- [5] Kent D., Olsen P. Magnetic polarity stratigraphy and paleolatitude of the Triassic-Jurassic Blomidon Formation in the Fundy basin (Canada): implications for Early Mesozoic tropical climate gradients. Earth and Planetary Sciences Letters, 179 (2000), pp. 311-324.

- [6] Olsen P., Kent D., Sues H., Koeberl C., Huber H., Montanari A., Rainforth E., Fowell S., Szajina M., Hartline B. Ascent of dinosaurs linked to an iridium anomaly at the Triassic-Jurassic boundary. Science, 296 (2002), pp.1305-1307.
- [7] Marzoli A., Renne P., Piccirillo E., Ernesto A., Bellieni G., De Min A. Extensive 200-million-year-old continental flood basalts of the Central Atlantic magmatic province. Science, 284 (1999), pp. 616-618.
- [8] McRoberts C., Furrer H., Jones D. Palaeoenvironmental interpretation of a Triassic-Jurassic boundary section from Western Austria based on palaeoecological and geochemical data. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 136 (1997), pp. 79-95.
- [9] Pálfy J., Demény A., Haas J., HHetényi M., Orchard M., Veto I. Carbon isotope anomaly and other geochemical changes at the Triassic-Jurassic boundary from a marine section in Hungary. Geology 29 (2001), pp. 1047-1050.
- [10] Suan G., Follmi K., Adatte T., Bomou B., Spangenberg J., Van de Schootbrugge
 B. Major environmental change and bonebed genesis prior to the Triassic-Jurassic mass extinction. Journal of the Geological Society of London 169 (2011), pp. 191-200.
- [11] Galli M., Jadoul F., Bernasconi S., Weissert H. Anomalies in global carbon cycling and extinction at the Triassic/Jurassic boundary: evidence from a marine C-isotope record. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 216 (2005), pp. 203-214.
- [12] Ferrio J., Voltas J., Buxó R., Araus J. Isótopos estables aplicados al estudio de los sistemas paleoagrícolas mediterráneos. Ecosistemas, 15 (2006), pp. 59-68.
- [13] Cárdenas Y., Guerra L., Mauricio D. Diseño de un algoritmo genético para la generación de conocimiento en el diagnóstico del Sindrome Autista. Revista de Ingenieria de Sistema e Informática, 6 (2009), pp. 91-97.

- [14] Hurtado N., Aldana M., Torres J. Comparison between Neuro-Fuzzy and Fractal Models for Permeability Prediction. Computational Geosciences, 13 (2009), pp. 181-186.
- [15] Kar S., Das S., Kanti P. Aplications of neuro fuzzy systems: A brief review and future outline. Aplied Soft Computing, 15 (2014), pp. 243-259.
- [16] Wu Y., Zhang B., Lu J., Du K. Fuzzy Logic and Neuro fuzzy Systems: A Systematic Introduction. International Journal of Artificial Intelligence and Expert Systems 2 (2011), pp. 47-80.
- [17] Da Silva A., Constanzo V., Hurtado N., Aldana M., Bayona G., Guzmán O., López D. Study of a possible correlation between miocene global climatic changes (δ¹⁸O) and magnetic proxies, using neuro fuzzy logic analysis. Studia Geophysica et Geodaetica, 54 (2009), pp. 607-631.
- [18] Zoveidavianpoor M., Samsuri A., Reza S. Adaptative neuro fuzzy inference system for compressional wave velocity prediction in a carbonate reservoir. Journal of Applied Geophysics, 89 (2013), pp. 96-107.
- [19] Galli MT., Jadoul F., Bernasconi S., Cirilli S., Weissert H. Stratigraphy and palaeoenviromental analysis of the Triassic-Jurassic transition in the western Southern Alps (Northern Italy). Palaeoogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 244 (2007), pp. 52-70.
- [20] Rozanski K., Gonfiantini R. Isótopos en estudios climatológicos. Boletin de la Organización Internacional de la Energía Atómica OIEA 4 (1990), pp. 9-15.
- [21] Cronin T. Paleoclimates: Understanding climate change past and present. Columbia University Press (2009), New York.
- [22] Hallam A. How catastrophic was the-end Triassic mass extinction. Lethaia, 35 (2002), pp. 147-157.

- [23] Hautmann M. Effect of the end-Triassic CO₂ maximum on carbonate sedimentation and marine mass extinction. Facies 50 (2004), pp. 257-261.
- [24] Jang J. ANFIS: Adaptative-network-based fuzzy inference system. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, 23 (1993), pp. 665-685.

APÉNDICE A

DATOS UTILIZADOS

En éste apéndice se muestran los datos utilizados para la elaboración de este trabajo. Los datos provienen de los Alpes sur-occidentales al norte de Italia (Alpes de Bérgamo), en dos secciones, sección cantera Italcementi y sección Iseo, ambas separadas entre sí aproximadamente 45 Kilómetros.

A.1. Sección Iseo

A continuación se muestran, a profundidad, los datos utilizados provenientes de la sección Iseo.



Figura A.1: Datos utilizados, de profundidad aproximada 45 metros; la línea horizontal representa la transcición Triásico/Jurásico.

A.2. Sección Cantera Italcementi

A continuación se muestran, a profundidad, los datos utilizados provenientes de la sección cantera Italcementi.



Figura A.2: Datos utilizados, de profundidad aproximada 35 metros, la línea horizontal representa la transición Triásico/Jurásico.

apéndice B_____

_REGLAS DIFUSAS Y FUNCIONES DE PERTENENCIA

En este apéndice se muestran las gráficas, con las cuales fue posible realizar un análisis cualitativo para cada función de membresía, en cada una de estas figuras se muestra, la gráfica a profundidad proveniente del núcleo, la procesada con 2 reglas difusas y la procesada con 3 reglas difusas, los datos utilizados provienen de las secciones Iseo y cantera Italcementi respectivamente; ubicadas en los Alpes sur occidentales al norte de Italia (Alpes de Bérgamo).

















76







Figura B.7: Resultados a profundidad provenientes de: datos de núcleo (núcleo), inferencia con 2 reglas difusas (2R) y 3 reglas difusas (3R). Funciones de membresía: gaussiana de 2 caras (FM:gauss2) y pi (FM:pi). Sección Iseo.











Apéndice B: Reglas difusas y funciones de pertenencia

















⁸⁵ Figura B.14: Resultados a profundidad provenientes de: datos de núcleo (núcleo), inferencia con 2 reglas difusas (2R) y 3 reglas difusas (3R). Funciones de membresía: Campana generalizada (FM:gbell) y Gaussiana (FM:gauss). Sección cantera Italcementi.









APÉNDICE C

LISÓTOPO DE OXÍGENO 18 EN FUNCIÓN DE LOS ISÓTOPOS DE CARBONO 13

En este apéndice se muestran todas las pruebas que fueron realizadas utilizando el isótopo de oxígeno 18 ($\delta^{18}O$) en función de los isótopos de carbono 13, tanto el proveniente de muestras orgánicas ($\delta^{13}C_{org}$) como el de los carbonatos ($\delta^{13}C_{carb}$).

C.1. Sección Iseo

C.1.1. Usando valores de $\delta^{13}C_{org}$

La red neuro-difusa se entrenó con valores de entrada de $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{org}$, utilizando un mínimo de 2 ([2]) reglas a un máximo de 4 ([4]) reglas difusas.
Funciones	[2]	[3]	[4]
trimf	1,0808	1,0891	0,9732
trapmf	1,1003	1,0259	0,9565
gbellmf	1,0272	0,9216	0,8973
gaussmf	1,0403	0,9742	0,9041
gauss2mf	1,0921	1,0242	0,8590
pimf	1,0912	1,0239	0,8866
dsigmf	1,0921	1,0247	0,9085
psigmf	1,0921	1,0246	0,9085

Tabla C.1: Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{org}$, al combinar las diferentes funciones de membresía, usando [2], [3] y [4] reglas difusas.



Figura C.1: Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{org}$, donde las reglas difusas están representadas con: [2] en rombo; [3] en cuadrado y [4] en triángulo.

C.1.2. Usando valores de $\delta^{13}C_{carb}$

La red neuro-difusa se entrenó con valores de entrada de $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{carb}$, utilizando un mínimo de 2 reglas a un máximo de 4 reglas difusas.

Funciones	[2]	[3]	[4]
trimf	1,1605	1,1592	1,1535
trapmf	1,1783	1,1582	1,1100
gbellmf	1,1581	1,1433	1,0514
gaussmf	1,1551	1,1467	1,0514
gauss2mf	1,1653	1,1496	1,0252
pimf	1,1529	1,0767	1,0152
dsigmf	1,1534	1,1488	1,0493
psigmf	1,1554	1,1488	1,0494

Tabla C.2: Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{carb}$, al combinar las diferentes funciones de membresía, usando [2], [3] y [4] reglas difusas.



Figura C.2: Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{carb}$, donde las reglas difusas están representadas con: [2] en rombo; [3] en cuadrado y [4] en triángulo.

C.1.3. Usando valores de $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$

La red neuro-difusa se entrenó con valores de entrada de $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$, asignando [2 1], [1 2], [3 1], [1 3] y [2 2] reglas difusas.

Funciones	$[2 \ 1]$	[1 2]	$[3\ 1]$	[1 3]	$[2 \ 2]$
trapmf	0,9557	1,0464	0,9678	0,9717	0,9035
gbellmf	1,0473	1,0548	0,9116	1,0229	0,8102
gaussmf	0,9369	0,9903	0,9044	0,9509	0,8511
gauss2mf	0,9291	0,9775	0,8278	0,9498	0,8089
pimf	0,9196	0,9623	0,9519	0,8793	0,7999
dsigmf	1,0288	1,0683	0,9619	1,0110	0,7936
psigmf	1,0288	1,0683	0,9619	1,0110	0,7936

Tabla C.3: Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$, al combinar las funciones de membresía, usando [2 1], [1 2], [3 1], [1 3] Y [2 2] reglas difusas, ésto representa $[\delta^{13}C_{org} \ \delta^{13}C_{carb}]$.



Figura C.3: Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$, donde las reglas difusas están representadas con: [2 1] rombos llenos; [1 2] rombos vacíos; [3 1] cuadros llenos; [1 3] cuadros vacíos y [2 2] triángulos. Refiriéndonos en todos los casos a las combinaciones : $[\delta^{13}C_{org} \ \delta^{13}C_{carb}]$.

C.2. Sección cantera Italcementi

C.2.1. Usando valores de $\delta^{13}C_{org}$

La red neuro-difusa se entrenó con valores de entrada de $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{org}$, utilizando un mínimo de 2 ([2]) reglas a un máximo de 4 ([4]) reglas difusas.

Funciones	[2]	[3]	[4]
trimf	0,5789	0,5732	0,5713
trapmf	0,5822	0,5798	0,5672
gbellmf	0,5782	0,5701	0,5597
gaussmf	0,5793	0,5699	0,5561
gauss2mf	0,5775	0,5645	0,5649
pimf	0,5780	0,5641	0,5640
dsigmf	0,5804	0,5734	0,5601
psigmf	0,5803	0,5735	0,5601

Tabla C.4: Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{org}$, al combinar las diferentes funciones de membresía, usando [2], [3] y [4] reglas difusas.



Figura C.4: Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{org}$, donde las reglas difusas están representadas con: [2] en rombo; [3] en cuadrado y [4] en triángulo.

C.2.2. Usando valores de $\delta^{13}C_{carb}$

La red neuro-difusa se entrenó con valores de entrada de $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{carb}$, utilizando un mínimo de 2 reglas a un máximo de 4 reglas difusas.

Funciones	[2]	[3]	[4]
trimf	0,9963	0,7873	0,8160
trapmf	0,9329	0,8799	0,7797
gbellmf	0,8093	0,7975	0,7781
gaussmf	0,9868	0,7969	0,7876
gauss2mf	0,8542	0,8717	0,7766
pimf	0,8489	0,8794	0,7751
dsigmf	0,8542	0,7975	0,7803
psigmf	0,8543	0,7975	0,7804

Apéndice C: Isótopo de Oxígeno 18 en función de los isótopos de Carbono 13 94

Tabla C.5: Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C_{carb}$, al combinar las diferentes funciones de membresía, usando [2], [3] y [4] reglas difusas.



Figura C.5: Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O \ge \delta^{13}C_{carb}$, donde las reglas difusas están representadas con: [2] en rombo; [3] en cuadrado y [4] en triángulo.

C.2.3. Resultados entre $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$

La red neuro-difusa se entrenó con valores de entrada de $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$, asignando [2 1], [1 2], [3 1], [1 3] y [2 2] reglas difusas.

Funciones	[2 1]	[1 2]	[3 1]	[1 3]	[2 2]
trapmf	0,5666	0,5789	0,5643	0,4647	0,5349
gbellmf	0,5732	0,5830	0,5710	0,5708	0,2288
gaussmf	0,5667	0,5809	0,5543	0,5314	0,5345
gauss2mf	0,5650	0,5801	0,5578	0,4259	0,5323
pimf	0,5654	0,5737	0,5361	0,3634	0,5310
dsigmf	0,5700	0,5837	0,5754	0,5652	0,5420
psigmf	0,5700	0,5838	0,5754	0,5653	0,5420

Tabla C.6: Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$, donde las reglas difusas están representadas con: [2 1] rombos llenos; [1 2] rombos vacíos; [3 1] cuadros llenos; [1 3] cuadros vacíos y [2 2] triángulos. Refiriéndonos en todos los casos a las combinaciones :[$\delta^{13}C_{org}$ $\delta^{13}C_{carb}$].



Figura C.6: Valores de RMSE para los isótopos $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{org}$ y $\delta^{13}C_{carb}$, donde las reglas difusas están representadas con: [2 1] en rombo; [1 2] en cuadrado; [3 1] en triángulo; [1 3] en equis y [2 2] en círculo.