

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS MARKOVIANO EN SUCESIONES ALUVIALES, A LA PREDICCIÓN DE FACIES HIDROGEOQUÍMICAS. UN EJEMPLO DE LA CUENCA DE MADRID. (ESPAÑA CENTRAL).

E. Chacón Oreja, T. de Torres Pérez-Hidalgo, F.J. Coello Bravo, M. García-Sañudo, T. Nestares García, J.E. Ortiz Menéndez, A. Peláez Martínez.

Departamento de Ingeniería Geológica. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, Ríos Rosas 21, 28003 Madrid.

RESUMEN.

En este trabajo se aplica el análisis por cadenas de Markov a sucesiones estratigráficas del Neógeno de la Cuenca de Madrid. Los datos proceden de sondeos mecánicos de reconocimiento que atraviesan depósitos de abanico aluvial y de playa fangosa. Permite determinar la aparición de procesos repetitivos en el espacio y en el tiempo y, en el caso que nos ocupa, detectar aquellos estados (facies), cuya aparición dependa sólo del estado (facies) anterior. El método comprende el cálculo de matrices de contaje, matrices de frecuencias esperadas, matrices de diferencias proporcionales y aplicación del test de Chi-cuadrado. Para cada sondeo se han determinado las sucesiones de facies significativamente ligadas, eliminándose las otras. Este tipo de análisis se revelan de interés a la hora de predecir facies hidrogeoquímicas.

ABSTRACT.

We have applied Markov chain analysis to Neogene stratigraphical successions from Madrid basin. Data were obtained from borehole lithologs comprising alluvial fan and mud flat playa deposits. Markov chain analysis allows to determine repetitive process through time and space and, in this case, to detect stages (facies) which appearance is linked to the immediately preceeding stage (facies). The method comprises transition-count matrix, independent trials matrix and proportional difference matrix calculation, as well as Chi-square test calculation. For each borehole litholog significative facies succession were calculated and described, others were rejected. This analysis is an usefull tool for hidrogeochemical facies prediction.

Introducción.

En este trabajo se aplica el análisis por cadenas de Markov a las sucesiones obtenidas en tres sondeos representativos de los sistemas aluviales neógenos de la Cuenca de Madrid, ENUSA (1984). Se analizan las sucesiones de facies descritas en el litolog del

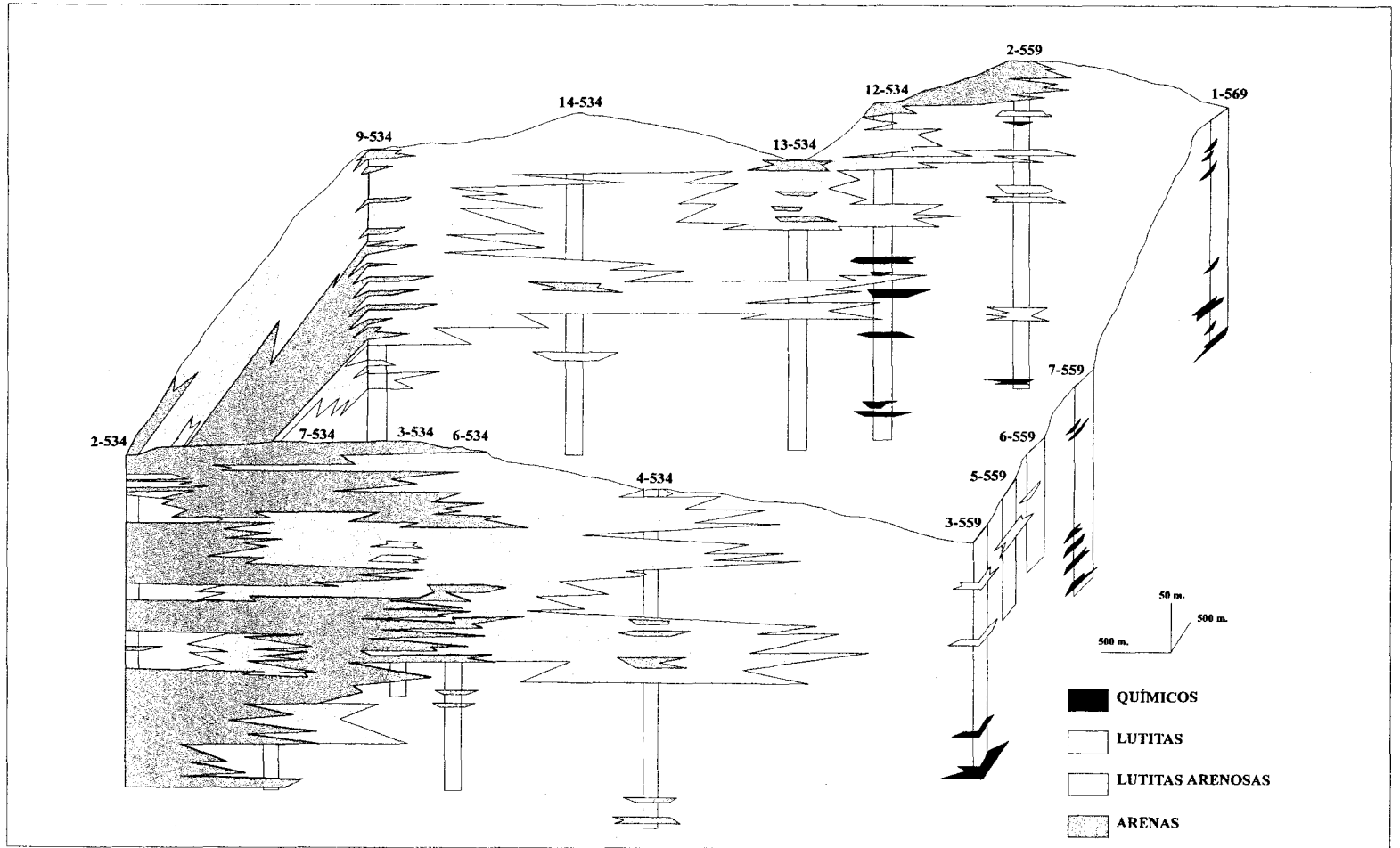


Fig. 1- Correlación de los sondeos.

sondeo. Los sondeos se sitúan en la vecindad del Pueblo de Paracuellos de Jarama y tienen las denominaciones siguientes: 534/2-Alcobendas I (X=449092, Y=4487760, Z=622), 534/4-Paracuellos 4 (X=452578, Y=4484839, Z=579) y 559/7-Paracuellos (X=454541, Y=4482422, Z=572).

En esta zona la sedimentación vino configurada por una distribución centripeta de facies: abanico aluvial-llanura fangosa, en tránsito a sabkhas. Los materiales aportados por los sistemas de abanicos aluviales, proceden, en buena parte, de la alteración, erosión y transporte de los extensos afloramientos de granitoides y rocas paleozoicas en el Sistema Central. Estos condicionantes litológicos de la cuenca de recepción hidrográfica fueron poco adecuados para el mantenimiento de una inercia hidrológica; esto explicaría el desarrollo de sistemas de canales, con organización radial, abanicos, muy penetrativos, pero efímeros, con poco encajamiento y apilamiento multiepisódico, expuestos a condiciones de oxidación. Distalmente gradan a llanuras fangosas y zonas hipersalinas donde se sedimentaron arcillas de neoformación, esmectitas magnesianas según Alonso *et al.* (1986), sulfatos y cloruros. Los sondeos cortan fundamentalmente materiales de las denominadas Unidad Inferior (Ageniense-Aragoniense medio) y Unidad Intermedia del Neógeno (Alberdi *et al.*, 1983; Junco y Calvo, 1983; Hoyos *et al.*, 1985) y penetran en la parte distal de un importante abanico aluvial cuyo ápice estaba situado en el saliente de Colmenar Viejo, cuya evolución espacial durante el Mioceno se conoce a través de sondeos (Chica *et al.*, 1995).

El biombo de correlación de los sondeos (Fig.1) muestra la gradación entre los materiales predominantemente arenosos del sondeo 534/2 y los del sondeo 559/7 en los que hay abundantes lutitas, localmente con depósitos de arcillas neoformadas, mientras que el sondeo 534/4 situado en una zona intermedia, participa de ambas características.

El análisis por cadenas de Markov.

Un proceso o cadena de Markov es una secuencia (Powers y Easterling, 1982) en la que la aparición de un estado determinado está influenciado o depende sólo del inmediatamente anterior. Es una técnica estadística que permite detectar procesos repetitivos en el espacio o el tiempo (Miall, 1973; Torres *et al.*, 1996).

El análisis por cadenas de Markov ha sido empleado desde hace mucho tiempo (Vistelius, 1949) para el estudio de sucesiones de facies. El trabajo con secciones estratigráficas comienza con la elaboración una matriz de contaje (*Transition-count Matrix*) cuyos términos registran las transiciones de una litofacies a la suprayacente, de forma que un término genérico O_i , registraría el número de veces que, en la sección estratigráfica considerada, la facies "j" aparece sobre la "i". Para ello, se suelen adoptar dos metodologías básicamente distintas (Miall, 1973): se toman las litofacies a intervalos regulares, con lo que el número de transiciones diferenciadas dependerá del tamaño del intervalo elegido, o se toman en consideración todos los cambios de facies

detectables, con independencia de su potencia, lo que obliga a que la diagonal principal de la matriz sea cero. Este segundo método se conoce como análisis de Markov embebido de primer orden (*First-order embedded Markov analysis*) y es el que vamos a emplear en este trabajo.

De acuerdo con los supuestos de Le Roux (1994), se desarrolló un programa en visual-Basic para el análisis según cadenas de Markov utilizando una matriz de diferencias proporcionales (*Proportional Difference Matrix*) y un método iterativo (Powers y Easterling, 1982) para la construcción de la matriz de frecuencias esperadas (*Independent Trials Matrix*), que se calcula a partir de la matriz contadora.

Con las matrices de las frecuencias observadas y las esperadas, se calcula el estadístico Chi-cuadrado y se comprueba la aceptabilidad de la hipótesis nula o de cuasi-independencia. En caso de rechazo de la hipótesis nula, se determinan aquellas transiciones que toman un valor superior en la matriz de diferencias proporcionales y que, por lo tanto, más contribuyen a la falta de cuasi-independencia.

El proceso es el siguiente: las celdas con el valor más alto son eliminadas progresivamente hasta que el estadístico Chi-cuadrado, para la matriz que queda (*Residual Independent Trials Matrix*), satisfaga el requisito de cuasi-independencia (i. e. hasta que la hipótesis nula sea aceptada). Las celdas así eliminadas representan las transiciones significativas, a partir de las cuales se puede construir un modelo de sucesión de facies.

Se separaron las litologías siguientes: 1-Gravas. 2-Arenas. 3-Limos. 4-Lutitas arenosas/arenas muy lutíticas. 5-Lutitas (limo+arcilla) masivas. 6-Lutitas yesíferas. 7-Lutitas con suelos (calcimórficos-raíces, caliches, bioturbación). 8-Químicos (carbonatos y sulfatos).

A continuación se van a describir las sucesiones de facies significativas en cada sondeo mediante matrices de transiciones significativas y los diagramas de flujo que derivan de ellas.

En el sondeo 534/2 (Alcobendas-I), el más proximal, sólo aparecen representadas tres facies significativas: arenas (2), arenas muy lutíticas/lutitas muy arenosas (4) y lutitas masivas (5). La distribución de facies gravita sobre las arenas muy lutíticas/ lutitas muy arenosas (4) que se alternan con arenas, posiblemente reflejando momentos con gradientes hidráulicos y/o confinamiento distintos. La superposición de la facies de arena (2) sobre las lutitas masivas (5) refleja la interacción de los canales sobre la llanura fangosa de pie de abanico. Estas sucesiones se pueden interpretar como ciclos que comienzan con depósitos transportados por corrientes tractivas de baja eficiencia o de escaso confinamiento que depositan las arenas lutíticas/lutitas muy arenosas (4), seguidos por sistemas más organizados y penetrativos, canales, responsables de los cuerpos de naturaleza arenosa (2), que incidirán los depósitos de lutitas de decantación (5).

El análisis de facies del sondeo 534/4 (Paracuellos-4) a través de la matriz de transiciones significativas y de los diagramas de flujo, es muy interesante, dado que aparecen dos

diagramas de flujo sin conexión. Uno de ellos implica la relación biunívoca entre lutitas arenosas/arenas lutíticas (4) a muro, y arenas (2); esto se explicaría como resultado de la entrada en partes más externas de la llanura fangosa de canales de los abanicos aluviales. El otro diagrama de flujo refleja que desde una facies dominante de lutitas (5) se pasa a lutitas con procesos edáficos (7) y a depósitos químicos (8) que en este sondeo son mayoritariamente carbonatos. Esta relación permite pensar en un ambiente de playa fangosa ("mud flat playa"), con períodos prolongados de exposición atmosférica, durante los que se desarrollan fenómenos edáficos y áreas con encharcamientos que depositan materiales carbonatados en condiciones muy someras, siendo a su vez sometidos a procesos edáficos (carácter palustre).

El análisis de facies del sondeo 559/7 (Paracuellos), pese a estar situado en una zona algo más central de la Cuenca de Madrid, vuelve a poner de manifiesto la desconexión existente entre las facies de depósitos químicos (8) y las lutitas yesíferas (6), que en la vertical suceden a las lutitas masivas (5). Estas a su vez, siempre aparecen a techo de los sedimentos químicos (8).

Análisis del sondeo 5342

A. Matriz contadora.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0	0	0	1	0	0	0
2	0	-	0	22	10	0	0	0
3	0	0	-	0	0	0	0	0
4	0	24	0	-	2	0	0	0
5	1	5	0	4	-	0	0	0
6	0	0	0	0	0	-	0	0
7	0	0	0	0	0	0	-	0
8	0	0	0	0	0	0	0	-

B. Matriz de frecuencias esperadas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0.6	-	0.3	0.1	-	-	-
2	0.6	-	-	21.9	9.0	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0.3	22.2	-	-	3.9	-	-	-
5	0.1	5.1	-	3.8	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-

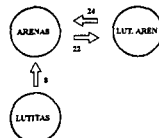
C. Matriz de diferencias proporcionales

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0.00	-	0.00	0.01	-	-	-
2	0.00	-	-	0.03	0.13	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0.00	0.39	-	-	-0.05	-	-	-
5	0.01	-0.13	-	0.01	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-

C. Matriz de transiciones significativas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1
2	.	.	.	22	.	.	.	.
3
4	.	24	.	.	.	.	.	.
5	.	5	.	.	.	.	.	.
6
7
8

$\chi^2 = 0.053$ 2 d.f. $p = 0.97$



Análisis del sondeo 534/4

A. Matriz contadora.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0	0	0	1	0	0	0
2	0	-	0	11	6	0	2	0
3	0	0	-	1	1	0	0	0
4	0	12	0	-	10	1	2	1
5	2	7	2	8	-	1	20	23
6	0	0	0	0	2	-	0	0
7	0	0	0	5	19	0	-	1
8	0	0	0	1	25	0	1	-

B. Matriz de frecuencias esperadas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0.1	0.0	0.1	0.6	0.0	0.1	0.1
2	0.2	-	0.2	2.4	11.5	0.2	2.3	2.3
3	0.0	0.2	-	0.2	1.1	0.0	0.2	0.2
4	0.2	2.4	0.2	-	16.4	0.2	3.3	3.3
5	1.1	11.5	1.1	16.4	-	1.1	15.7	15.7
6	0.0	0.2	0.0	0.2	1.1	-	0.2	0.2
7	0.2	2.3	0.2	3.3	15.7	0.2	-	3.1
8	0.2	2.3	0.2	3.3	15.7	0.2	3.1	-

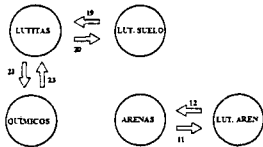
C. Matriz de diferencias proporcionales

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	-	0.00	0.58	-0.20	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.71	0.00	-	-0.39	0.00	-0.02	-0.01
5	0.01	-0.20	0.01	-0.41	-	0.00	0.53	1.03
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	-	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.05	0.39	0.00	-	-0.01
8	0.00	0.00	0.00	-0.01	1.04	0.00	-0.01	-

C. Matriz de transiciones significativas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	*	*	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	11	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*	*	*	*
4	*	12	*	*	*	*	*	*
5	*	*	*	*	*	*	20	23
6	*	*	*	*	*	*	*	*
7	*	*	*	*	19	*	*	*
8	*	*	*	*	25	*	*	*

$\chi^2 = 16.95$ 35 df $p = 0.99$



Análisis del sondeo 559/7

A. Matriz contadora.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	0	0	0	0	0	0	0
2	0	-	0	0	3	0	1	0
3	0	0	-	0	0	0	0	0
4	0	1	0	-	0	0	3	0
5	0	2	0	1	-	12	38	6
6	0	0	0	0	11	-	5	0
7	0	1	0	3	39	4	-	1
8	0	0	0	0	5	0	1	-

B. Matriz de frecuencias esperadas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	0.1	2.2	0.3	1.3	0.1
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	0.1	-	-	2.2	0.3	1.3	0.1
5	-	2.1	-	2.1	-	9.0	37.6	3.7
6	-	0.3	-	0.3	9.6	-	5.7	0.6
7	-	1.4	-	1.4	40.6	5.8	-	2.4
8	-	0.1	-	0.1	3.4	0.5	2.0	-

C. Matriz de diferencias proporcionales

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	0.01	-	-	0.00	0.00	0.04	0.00
5	-	0.00	-	-0.01	-	0.26	0.12	0.10
6	-	0.00	-	0.00	0.11	-	-0.03	0.00
7	-	0.00	-	0.04	-0.44	-0.05	-	-0.01
8	-	0.00	-	0.00	0.06	0.00	-0.01	-

C. Matriz de transiciones significativas

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	*	*	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*	*	*	*
4	*	*	*	*	*	*	*	*
5	*	*	*	*	*	12	*	*
6	*	*	*	*	*	*	*	*
7	*	*	*	*	*	*	*	*
8	*	*	*	*	5	*	*	*

$\chi^2 = 23.07$ 17 df $p = 0.15$



Conclusiones.

El análisis de sucesiones litológicas por cadenas de Markov se revela como un interesante instrumento para el análisis de asociaciones de facies. Permite pasar de un plano subjetivo que explica sucesiones lógicas, basadas en el conocimiento personal del geólogo de campo, a un plano relativamente objetivo en el que se manejan tests de hipótesis, mediante los que se seleccionan las transiciones significativas con distintos niveles de significación. Como se deduce de los resultados de este trabajo, dichas transiciones implican en algunos casos la superposición de fenómenos ligados a paleoambientes distintos. Su aplicación como elemento predictivo de la presencia de facies hidrogeoquímicas en materiales que, en ocasiones, tienen carácter de acuícludos es evidente.

BIBLIOGRAFÍA.

- Alberdi, M.T., Hoyos, M., Junco, F., López Martínez, N., Morales, J., Sesé, C. Soria, D. (1983). Biostratigraphie et évolution sédimentaire e l'aire de Madrid. Abstract Interin Coll. o Evolution. Montpellier, Abril.
- Alonso, M.A., Calvo, J.P. y García del Cura, M.C. (1986): Sedimentología y petrología de los abanicos aluviales y facies adyacentes en el Neógeno de Paracuellos del Jarama (Madrid). Estudios Geol., 42: 79-101.
- Chica, T., Torres, T., Maldonado, A., Querol, R. y Zamora, I. (1995). Evolución en el subsuelo de los sistemas de abanicos aluviales del Mioceno de la Cuenca de Madrid (España). Geogaceta, 18 (1995): 56-58.
- ENUSA (1984). Exploración de uranio Cuenca del Tajo. (Informe inédito).
- Hoyos M. Junco, F., Plaza, J.R., Ramírez, A. y Ruiz, J. (1985). El Mioceno de Madrid. En: M.T. Alberdi (Coord.). Geología y Paleontología del Terciario continental de la provincia de Madrid. CSIC, Madrid: 9-16.
- Junco, F. y Calvo, J.P. (1983). Cuenca de Madrid. Geología de España. Tomo II. IGME: 534-543.
- Le Roux, J.P., (1994). Spreadsheet procedure for modified first-order embedded Markov analysis of cyclicity in sediments. Computers & Geosciences (1994) 20, 1: 17-22.
- Miall, A.D. (1973). Markov chain analysis applied to an ancient alluvial plain succession. Sedimentology (1973) 20: 347-364.
- Powers, D.W. y Easterling, R.G. (1982). Improved methodology for using embedded Markov chains to describe cyclical sediments. J. Sediment. Petrol. 52: 913-923.
- Torres, T. Coello, F.J. García-Sañudo, M. Nestares, T. Ortiz, J.E. Peláez, A. (1996). Análisis markoviano de las sucesiones de abanicos aluviales de la Cuenca de Madrid y de la Depresión Intermedia (Madrid y Guadalajara, España Central). Cuad. Geol. Ib. 21: 345-368.
- Vistelius, A.B. (1949). On the question of the mechanism of formation of strata. Dokl. Akad. Nauk. SSSR 65: 191-194.