

- 1.— En el conjunto de las matrices $n \times n$ de elementos reales, demostrar que el producto de matrices triangulares inferiores es otra matriz triangular inferior.

Sean A y B dos matrices triangulares inferiores. Verifican $a_{ij} = b_{ij} = 0$ cuando $i < j$. Queremos ver que $C = AB$ es triangular inferior. Para ello hay que comprobar que $c_{ij} = 0$ cuando $i < j$.

Sea $i < j$; por la definición de producto de matrices, el término c_{ij} es:

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ik}b_{kj}$$

Separamos esta sumatorio en dos:

$$c_{ij} = \left(\sum_{k=1}^i a_{ik}b_{kj} \right) + \left(\sum_{k=i+1}^n a_{ik}b_{kj} \right)$$

En el primer sumatorio $k \leq i < j$ y como B es triangular inferior, entonces $b_{kj} = 0$. Vemos que este primer sumando es 0. En el segundo sumatorio $i < k$ y como A es triangular inferior, entonces $a_{ik} = 0$. Por tanto este segundo sumando es también cero. Deducimos que $c_{ij} = 0$ para cualquier $i < j$ y así, $C = AB$ es triangular inferior.

(Primer parcial, febrero 2000)

- 2.— Sea A una matriz diagonal $n \times n$ y supongamos que todos los elementos de su diagonal son distintos entre sí. Demostrar que cualquier matriz $n \times n$ que conmute con A ha de ser diagonal.

(Examen final, junio 2002)

Sea B una matriz que conmuta con A , es decir, $AB = BA$. Queremos ver que B es diagonal, es decir, $b_{ij} = 0$ si $i \neq j$.

Comparemos los términos de las matrices AB y BA . El término en la fila i y columna j de AB es:

$$\sum_{k=0}^n a_{ik}b_{kj} = a_{ii}b_{ij}$$

ya que los términos a_{ik} con $i \neq k$ se anulan, por ser A diagonal. Por otra parte el término en la fila i y columna j de BA es:

$$\sum_{k=0}^n b_{ik}a_{kj} = b_{ij}a_{jj}$$

donde de nuevo los términos a_{kj} con $k \neq j$ se anulan.

Como $AB = BA$, entonces $a_{ii}b_{ij} = a_{jj}b_{ij}$ y $(a_{ii} - a_{jj})b_{ij} = 0$. Si $i \neq j$, entonces $a_{ii} - a_{jj} \neq 0$, porque habíamos supuesto que los términos de la diagonal de A son todos diferentes. Por tanto $b_{ij} = 0$ si $i \neq j$ y concluimos que B es una matriz diagonal.

7.— Dada la matriz:

$$A = \begin{pmatrix} x & x+1 & x+2 \\ x+3 & x+2 & x+1 \\ x+2 & x & x+4 \end{pmatrix}$$

(i) Hallar x para que $\det(A) = 0$.

Hacemos operaciones elementales que conservan el rango y el determinante. Comenzamos restando la primera fila a las demás:

$$\begin{pmatrix} x & x+1 & x+2 \\ 3 & 1 & -1 \\ 2 & -1 & 2 \end{pmatrix}$$

Restamos la primera columna a las otras dos:

$$\begin{pmatrix} x & 1 & 2 \\ 3 & -2 & -4 \\ 2 & -3 & 0 \end{pmatrix}$$

Finalmente a la primera fila le sumamos la mitad de la segunda:

$$\begin{pmatrix} x+3/2 & 0 & 0 \\ 3 & -2 & -4 \\ 2 & -3 & 0 \end{pmatrix}$$

Desarrollando por la primera fila el determinante queda:

$$\det(A) = (x + \frac{3}{2}) \begin{vmatrix} -2 & -4 \\ -3 & 0 \end{vmatrix} = -12(x + \frac{3}{2})$$

Deducimos que $\det(A) = 0$ si y sólo si $x = -3/2$.

(ii) Estudiar el rango de A en función de los valores de x .

Si $x = 3/2$ el determinante es nulo. En ese caso además vimos que el menor formado por las dos últimas filas y columnas de la matriz:

$$\begin{pmatrix} x+3/2 & 0 & 0 \\ 3 & -2 & -4 \\ 2 & -3 & 0 \end{pmatrix}$$

tiene determinante non nulo. Por tanto el rango es 2.

Si $x \neq 3/2$ el determinante es no nulo y así la matriz tiene rango 3.

11.— Calcular razonadamente los siguientes determinantes:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 2 & 1 & 1 \\ 3 & 4 & 5 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 1 & 0 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 2 & 4 \\ 3 & 0 & 5 & 7 \\ 0 & 2 & 1 & 1 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 1 & 12 & 123 & 1234 \\ 2 & 23 & 234 & 2341 \\ 3 & 34 & 341 & 3412 \\ 4 & 41 & 412 & 4123 \end{vmatrix}.$$

El primero puede desarrollarse por Sarrus:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 2 & 1 & 1 \\ 3 & 4 & 5 \end{vmatrix} = 1 \cdot 1 \cdot 5 + 2 \cdot 4 \cdot 3 + 0 \cdot 1 \cdot 3 - 3 \cdot 1 \cdot 3 - 1 \cdot 4 \cdot 1 - 2 \cdot 0 \cdot 5 = 16.$$

También se podría desarrollar por adjuntos. Es cómodo por la primera fila (porque tiene un elemento nulo):

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 2 & 1 & 1 \\ 3 & 4 & 5 \end{vmatrix} &= 1 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 4 & 5 \end{vmatrix} - 0 \cdot \begin{vmatrix} 2 & 1 \\ 3 & 5 \end{vmatrix} + 3 \cdot \begin{vmatrix} 2 & 1 \\ 3 & 4 \end{vmatrix} = \\ &= 1 \cdot (1 \cdot 5 - 1 \cdot 4) + 3 \cdot (2 \cdot 4 - 1 \cdot 3) = 16. \end{aligned}$$

O primero haber hecho "ceros" mediante operaciones fila y/o columna. Restando a la tercera columna la primera por tres:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 2 & 1 & 1 \\ 3 & 4 & 5 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & -5 \\ 3 & 4 & -4 \end{vmatrix} = 1 \cdot \begin{vmatrix} 1 & -5 \\ 4 & -4 \end{vmatrix} = 1 \cdot (-4) - (-5) \cdot 4 = 16.$$

El segundo puede ser desarrollado por adjuntos. Elegimos la segunda columna porque tiene dos ceros. Los menores multiplicados por cero ya no los escribimos:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 2 & 4 \\ 3 & 0 & 5 & 7 \\ 0 & 2 & 1 & 1 \end{vmatrix} = 1 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 5 & 7 \\ 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} + 2 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 4 \\ 3 & 5 & 7 \end{vmatrix}$$

Cada uno de los determinantes 3×3 puede ser desarrollado por Sarrus, por adjuntos o previamente simplificado mediante operaciones elementales:

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 5 & 7 \\ 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 3 \\ 3 & -2 & 7 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ 3 & -2 \end{vmatrix} = -2 + 3 = 1.$$

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 4 \\ 3 & 5 & 7 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 1 \\ 3 & 5 & 7 \end{vmatrix} = -1 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 5 \end{vmatrix} = -1 \cdot (5 - 6) = 1.$$

Por tanto:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 2 & 4 \\ 3 & 0 & 5 & 7 \\ 0 & 2 & 1 & 1 \end{vmatrix} = 1 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 5 & 7 \\ 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} + 2 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 4 \\ 3 & 5 & 7 \end{vmatrix} = 1 \cdot 1 + 2 \cdot 1 = 3.$$

Para resolver el tercero lo simplificamos mediante operaciones elementales. Restamos a cada columna la anterior multiplicada por 10 y queda:

$$\begin{vmatrix} 1 & 12 & 123 & 1234 \\ 2 & 23 & 234 & 2341 \\ 3 & 34 & 341 & 3412 \\ 4 & 41 & 412 & 4123 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 2 & 3 & 4 & 1 \\ 3 & 4 & 1 & 2 \\ 4 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 10 & 10 & 10 & 10 \\ 2 & 3 & 4 & 1 \\ 3 & 4 & 1 & 2 \\ 4 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} = 10 \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 3 & 4 & 1 \\ 3 & 4 & 1 & 2 \\ 4 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} =$$

$$= 10 \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & -1 \\ 0 & 1 & -2 & -1 \\ 0 & -3 & -2 & -1 \end{vmatrix} = 10 \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & -8 & -4 \end{vmatrix} = 160.$$

12.— Sabiendo que $\det \begin{pmatrix} 2 & b & 3 \\ a & 0 & 1 \\ 1 & 5 & c \end{pmatrix} = 5$ calcular:

(i) $\det \begin{pmatrix} 2-3a & b & 0 \\ 2 & b & 3 \\ 5 & 2b+5 & c+6 \end{pmatrix}$

Aplicamos las propiedades de los determinantes. Comenzamos restando la segunda fila a la primera y el doble de la segunda a la tercera:

$$\begin{vmatrix} -3a & 0 & -3 \\ 2 & b & 3 \\ 1 & 5 & c \end{vmatrix} = -3 \begin{vmatrix} a & 0 & 1 \\ 2 & b & 3 \\ 1 & 5 & c \end{vmatrix} = 3 \begin{vmatrix} 2 & b & 3 \\ a & 0 & 1 \\ 1 & 5 & c \end{vmatrix} = 3 \cdot 5 = 15.$$

$$(ii) \det \begin{pmatrix} b & 5 & 0 \\ 4 & c+2 & 2 \\ a+2 & 2a+1 & 2a \end{pmatrix}.$$

Sacamos factor común a 2 a la tercera columna; multiplicada por 1 y por 2 se la restamos a las primeras:

$$\begin{aligned} 2 \begin{vmatrix} b & 5 & 0 \\ 4 & c+2 & 1 \\ a+2 & 2a+1 & a \end{vmatrix} &= 2 \begin{vmatrix} b & 5 & 0 \\ 3 & c & 1 \\ 2 & 1 & a \end{vmatrix} = -2 \begin{vmatrix} b & 0 & 5 \\ 3 & 1 & c \\ 2 & a & 1 \end{vmatrix} = 2 \begin{vmatrix} 2 & a & 1 \\ 3 & 1 & c \\ b & 0 & 5 \end{vmatrix} = \\ &= -2 \begin{vmatrix} 2 & a & 1 \\ b & 0 & 5 \\ 3 & 1 & c \end{vmatrix} = -2 \det \begin{pmatrix} 2 & b & 3 \\ a & 0 & 1 \\ 1 & 5 & c \end{pmatrix}^t = -2 \cdot 5 = -10. \end{aligned}$$

13.— Sea $A = \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ -b & a & d & -c \\ -c & -d & a & b \\ -d & c & -b & a \end{pmatrix}$

(i) Hallar AA^t .

Hacemos la traspuesta y luego el producto:

$$\begin{aligned} AA^t &= \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ -b & a & d & -c \\ -c & -d & a & b \\ -d & c & -b & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & -b & -c & -d \\ b & a & -d & c \\ c & d & a & -b \\ d & -c & b & a \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} a^2 + b^2 + c^2 + d^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a^2 + b^2 + c^2 + d^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a^2 + b^2 + c^2 + d^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a^2 + b^2 + c^2 + d^2 \end{pmatrix} = \\ &= (a^2 + b^2 + c^2 + d^2)Id \end{aligned}$$

(ii) Calcular $\det(AA^t)$ y $\det(A)$.

$$\det(AA^t) = \det((a^2 + b^2 + c^2 + d^2)Id) = (a^2 + b^2 + c^2 + d^2)^4 \det(Id) = (a^2 + b^2 + c^2 + d^2)^4$$

y por otra parte:

$$\det(AA^t) = \det(A)\det(A^t) = \det(A)\det(A) = \det(A)^2$$

Por tanto:

$$\det(A) = \pm \sqrt{\det(AA^t)} = \pm (a^2 + b^2 + c^2 + d^2)^2.$$

Para decidir el signo notamos que si $b = c = d = 0$ entonces $A = aId$ y $\det(A) = a^4 = (a^2)^2$. Por tanto nos quedamos con la raíz positiva.

$$\det(A) = (a^2 + b^2 + c^2 + d^2)^2.$$

(iii) Determinar el rango de A en función de los valores de a, b, c, d .

Si $\det(A) \neq 0$ el rango es el máximo posible, es decir, 4. Pero:

$$\det(A) = 0 \iff (a^2 + b^2 + c^2 + d^2)^2 = 0 \iff a^2 + b^2 + c^2 + d^2 = 0 \iff a = b = c = d = 0.$$

Pero si $a = b = c = d = 0$ entonces $A = 0$ y $\text{rango}(A) = 0$. Concluimos que:

$$\text{rango}(A) = \begin{cases} 0 & \text{si } a = b = c = d = 0 \\ 4 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

14.— Dado $n \in \mathbb{N}$ se define la matriz $P_n \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$ como:

$$(P_n)_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } i = j + 1 \\ i & \text{si } i \neq j + 1 \end{cases}$$

(i) Escribir la matriz P_4 .

$$P_4 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 0 & 3 & 3 \\ 4 & 4 & 0 & 4 \end{pmatrix}$$

(ii) Hallar el determinante de P_4 .

Lo resolvemos en general en el siguiente apartado.

(iii) En general hallar $\det(P_n)$.

Tenemos:

$$|P_n| = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 2 & \dots & 2 & 2 \\ 3 & 0 & 3 & \dots & 3 & 3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ n-1 & n-1 & n-1 & \dots & n-1 & n-1 \\ n & n & n & \dots & 0 & n \end{vmatrix}$$

En cada fila i -ésima sacamos factor común i . Queda:

$$|P_n| = n! \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Restamos la primera fila a las demás:

$$|P_n| = n! \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 0 \end{vmatrix}$$

Desarrollando por la última columna queda:

$$|P_n| = n!(-1)^{n+1} \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{vmatrix} = n!(-1)^{n+1}(-1)^{n-1} = n!(-1)^{2n} = n!$$

Por tanto $\det(P_4) = 4! = 24$.

ÁLGEBRA LINEAL I Algunas soluciones a los problemas adicionales

Matrices y determinantes (Curso 2022–2023)

I.— En el conjunto de las matrices $n \times n$ de elementos reales, demostrar que si $AA^T = \Omega$, entonces $A = \Omega$.

Llamemos $B = A^T$. Entonces por definición de traspuesta, $b_{ij} = a_{ji}$. Ahora por hipótesis $\Omega = AA^t = AB$. Haciendo el producto vemos que para cualquier i, j con, $1 \leq i, j \leq n$:

$$0 = \sum_{k=0}^n a_{ik}b_{kj} = \sum_{k=0}^n a_{ik}a_{jk}$$

En particular, si $i = j$:

$$0 = \sum_{k=0}^n a_{ik}a_{ik} = \sum_{k=0}^n a_{ik}^2$$

Por ser A una matriz con coeficientes reales, los cuadrados a_{ik}^2 son siempre números no negativos. Si su suma es cero, todos ellos han de ser cero, y deducimos que $a_{ik} = 0$ para cualquier i, k con, $1 \leq i, k \leq n$. Por tanto $A = \Omega$.

(Primer parcial, febrero 2000)

II.— Calcular las potencias n -simas de las siguientes matrices:

El método (*¡de momento!*) más usual es hacer "a mano" las primeras potencias y luego encontrar una regla general:

(a) $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 2 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

Calculamos las primeras potencias

$$A^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 9 & 0 \\ 4 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad A^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 27 & 0 \\ 6 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad A^4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 81 & 0 \\ 8 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \dots$$

Parece razonable pensar que, en general:

$$A^n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 3^n & 0 \\ 2n & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Hay que comprobarlo. Se hace por inducción. Para ello:

- Vemos que se cumple para A^1 .

- Comprobamos que, si suponemos cierta la fórmula para $n - 1$, entonces se cumple para n , es decir:

$$A^n = A \cdot A^{n-1} = A \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 3^{n-1} & 0 \\ 2(n-1) & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 3^n & 0 \\ 2n & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

(b) $B = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$

Calculamos las primeras potencias:

$$B^2 = \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ -2 & 0 \end{pmatrix}, \quad B^3 = \begin{pmatrix} -2 & 2 \\ -2 & -2 \end{pmatrix}, \quad B^4 = \begin{pmatrix} -4 & 0 \\ 0 & -4 \end{pmatrix} = (-4)Id$$

Ahora es fácil continuar porque:

$$B^5 = B \cdot B^4 = (-4)B; \quad B^6 = (-4)B^2; \quad B^7 = (-4)B^3; \quad B^8 = (-4)^2 Id; \quad \dots$$

En general, el exponente n siempre lo podemos escribir como $n = 4d + r$ donde r es el resto de dividir n entre 4 y por tanto es un número entero comprendido entre 0 y 3. Tendremos:

$$B^n = B^{4d+r} = (B^4)^d \cdot B^r = (-4)^d Id \cdot B^r = (-4)^d B^r$$

En definitiva escribimos el resultado dependiendo de los 4 posibles valores de r :

$$B^n = (-4)^d \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \text{si } n = 4d;$$

$$B^n = (-4)^d \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}, \quad \text{si } n = 4d + 1;$$

$$B^n = (-4)^d \cdot \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ -2 & 0 \end{pmatrix}, \quad \text{si } n = 4d + 2;$$

$$B^n = (-4)^d \cdot \begin{pmatrix} -2 & 2 \\ -2 & -2 \end{pmatrix}, \quad \text{si } n = 4d + 3;$$

(c) $C = \begin{pmatrix} 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & b \\ c & 0 & 0 \end{pmatrix}$

Hacemos las primeras potencias:

$$C^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & ab \\ bc & 0 & 0 \\ 0 & ac & 0 \end{pmatrix}, \quad C^3 = \begin{pmatrix} abc & 0 & 0 \\ 0 & abc & 0 \\ 0 & 0 & abc \end{pmatrix} = abc \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Paramos en la tercera potencia. Nos fijamos que $C^3 = abcId$. Ahora es muy fácil multiplicar por C^3 . Podemos en general hacer lo siguiente. Dado $n > 0$, sabemos que $n = 3q + r$, donde q es el cociente y $r < 3$ es el resto de dividir n por 3. Por tanto:

$$C^n = C^{3q+r} = (C^3)^q C^r = (abcI)^q C^r = a^q b^q c^q C^r$$

y,

$$C^n = \begin{pmatrix} a^q b^q c^q & 0 & 0 \\ 0 & a^q b^q c^q & 0 \\ 0 & 0 & a^q b^q c^q \end{pmatrix}, \quad \text{si } n = 3q;$$

$$C^n = \begin{pmatrix} 0 & a^{q+1} b^q c^q & 0 \\ 0 & 0 & a^q + b^{q+1} c^q \\ a^q b^q c^{q+1} & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \text{si } n = 3q + 1;$$

$$C^n = \begin{pmatrix} 0 & 0 & a^{q+1} b^{q+1} c^q \\ a^q b^{q+1} c^{q+1} & 0 & 0 \\ 0 & a^{q+1} b^q c^{q+1} & 0 \end{pmatrix}, \quad \text{si } n = 3q + 2.$$

(d) $D = \begin{pmatrix} a^2 & ab & ac \\ ab & b^2 & bc \\ ac & bc & c^2 \end{pmatrix}$. Hacemos las primeras potencias:

$$D^2 = \begin{pmatrix} a^4 + a^2b^2 + a^2c^2 & a^3b + ab^3 + abc^2 & a^3c + ab^2c + ac^3 \\ a^3b + ab^3 + abc^2 & a^2b^2 + b^4 + b^2c^2 & a^2bc + b^3c + bc^3 \\ a^3c + ab^2c + ac^3 & a^2bc + b^3c + bc^3 & a^2c^2 + b^2c^2 + c^4 \end{pmatrix} = (a^2 + b^2 + c^2)D$$

Ahora es fácil seguir haciendo las potencias de D , porque:

$$\begin{aligned} D^3 &= D^2D = (a^2 + b^2 + c^2)D^2 = (a^2 + b^2 + c^2)^2D \\ D^4 &= D^3D = (a^2 + b^2 + c^2)^2D^2 = (a^2 + b^2 + c^2)^3D \\ &\dots \end{aligned}$$

En general vemos que;

$$D^n = (a^2 + b^2 + c^2)^{n-1}D$$

De nuevo hay que comprobarlo por inducción:

- Para $n = 1$ es cierto, ya que $D^1 = (a^2 + b^2 + c^2)^{1-1}D = D$.

- Lo suponemos cierto para $n - 1$ y lo probamos para n :

$$\begin{aligned} D^n &= D^{n-1} \cdot D = (a^2 + b^2 + c^2)^{n-2}D \cdot D = (a^2 + b^2 + c^2)^{n-2}D^2 = \\ &= (a^2 + b^2 + c^2)^{n-2}(a^2 + b^2 + c^2)D = (a^2 + b^2 + c^2)^{n-1}D. \end{aligned}$$

III.— Para las siguientes familias de matrices no singulares de $\mathcal{M}_{n \times n}(K)$, decidir si verifican alguna de las dos condiciones: (a) dada una matriz de la familia, su inversa también pertenece a la familia; (b) dadas dos matrices de la familia, su producto también pertenece a la familia.

(1) las matrices simétricas regulares,

(a) CIERTO. Que sea regular simplemente significa que tiene inversa. Y una matriz simétrica es aquella que coincide con su traspuesta.

Hay que probar que si una matriz es simétrica su inversa es también simétrica.

Basta usar las propiedades de la trasposición: $(A^{-1})^t = (A^t)^{-1}$ pero por ser A simétrica $A^t = A$, luego $(A^{-1})^t = A^{-1}$ y por tanto la inversa es simétrica.

(b) FALSO. Dadas A, B simétricas, veamos si lo es AB . Tenemos $(AB)^t = B^tA^t$; por ser A, B simétricas deducimos que $(AB)^t = BA$. Teniendo en cuenta que el producto de matrices no es conmutativo, en general $BA \neq AB$ y por tanto AB no tiene porque ser simétrica. Veamos un ejemplo del de dos matrices simétricas cuyo prdoducto NO lo es:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}, \quad AB = \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

(2) las matrices regulares que conmutan con una matriz dada $A \in \mathcal{M}_{n \times n}(K)$,

(a) CIERTO. Supongamos que una matriz regular B conmuta con A . Veamos que también conmuta su inversa. Por conmutar A y B se tiene $AB = BA$. Multiplicando ambos términos, por la derecha y por la izquierda por B^{-1} tenemos, $B^{-1}ABB^{-1} = B^{-1}BAB^{-1}$. Y como $BB^{-1} = B^{-1}B = I$ queda, $B^{-1}A = AB^{-1}$.

(b) CIERTO. Supongamos que B y C conmutan con A . Veamos que entonces BC también conmuta con A :

$$(BC)A = B(CA) = B(AC) = (BA)C = A(BC)$$

(3) las matrices ortogonales.

Una matriz ortogonal es aquella cuya inversa es igual a su traspuesta.

(a) CIERTO. Sea A ortogonal ($A^t = A^{-1}$). Veamos que A^{-1} es ortogonal:

$$(A^{-1})^t = (A^t)^{-1} = (A^{-1})^{-1}$$

Vemos que su traspuesta coincide con su inversa y es ortogonal.

(b) CIERTO. Sean A, B ortogonales. Veamos que AB es ortogonal.

$$(AB)^t = B^t A^t = B^{-1} A^{-1} = (AB)^{-1}$$

Luego vemos que su inversa coincide con su traspuesta.

V.— Para cada $n \in \mathbb{N}$ se define la matriz $A_n \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$ como:

$$A_n = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 4 & 4 & 4 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ n-1 & n-1 & n-1 & n-1 & \dots & 1 & 1 \\ n & n & n & n & \dots & n & 1 \end{pmatrix}$$

(i) Dar una expresión para el elemento a_{ij} en función de i, j .

En la diagonal y por encima de ella los elementos de la matriz son 1s. Es decir si el índice i de fila es menor o igual que el de la columna j entonces $a_{ij} = 1$. En otro caso los elementos de la matriz son iguales a la fila que ocupan:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i \leq j \\ i & \text{si } i > j \end{cases}$$

(ii) Calcular $\det(A_4)$.

Veremos en el apartado siguiente que $\det(A_n) = (-1)^{n-1}(n-1)!$. Por tanto $\det(A_4) = (-1)^3 \cdot 3! = -6$.

(iii) Para $n \geq 2$, calcular traza A_n , $\det(A_n)$ e $\text{rango}(A_n)$.

Tenemos $\text{traza}(A_n) = \underbrace{1 + 1 + \dots + 1}_n = n$.

Para el determinante a cada fila a partir de la segunda le restamos la primera multiplicada por el número de fila; a la segunda fila le restamos la primera por 2; a la tercera la primera por 3 y así sucesivamente. Queda:

$$\det(A_n) = \det \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & \dots & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -2 & -2 & \dots & -2 & -2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -(n-2) & -(n-2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -(n-1) \end{pmatrix} = (-1)^{n-1}(n-1)!$$

. El determinante nunca se anula y así el rango de la matriz es el máximo posible, es decir, $\text{rango}(A_n) = n$.

VI.— Sea X una matriz cuadrada de tamaño $n \times n$ y elementos reales. Sea k un número par. Probar que si $X^k = -Id$, entonces n es también un número par.

Si se cumple que $X^k = -Id$, aplicando determinantes obtenemos que

$$\det(X^k) = \det(-Id).$$

Pero $\det(X^k) = \det(X)^k$ y $\det(-Id) = (-1)^n$. Por tanto:

$$\det(X)^k = (-1)^n$$

Como k es par, $\det(X)^k$ es positivo; entonces $(-1)^n$ ha de ser positivo y en consecuencia n tiene que ser un número par.

VII.— Dada la matriz $m \times n$ con $m, n > 1$,

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n-1 & n \\ n+1 & n+2 & \dots & 2n-1 & 2n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ (m-1)n+1 & (m-1)n+2 & \dots & mn-1 & mn \end{pmatrix}$$

expresar a_{ij} en función de i y j , y calcular su rango.

El término a_{ij} es de la forma:

$$a_{ij} = j + (i-1) \cdot n$$

Para hallar el rango hacemos operaciones fila y columna sobre la matriz A .

Le restamos la primera fila a todas las demás:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n-1 & n \\ n & n & \dots & n & n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ (m-1)n & (m-1)n & \dots & (m-1)n & (m-1)n \end{pmatrix}$$

Ahora le restamos la primera columna a todas las demás:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & n-2 & n-1 \\ n & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ (m-1)n & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Vemos que las filas $3, \dots, m$ son proporcionales a la segunda. Por tanto el rango es a lo sumo 2. Para ver que el rango es exactamente 2 basta mostrar un menor 2×2 de determinante no nulo:

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ n & 0 \end{vmatrix} = -n.$$

VIII.— Si $A = \begin{pmatrix} a & b & c \\ p & q & r \\ u & v & w \end{pmatrix}$ y $\det(A) = 3$, calcular $\det(2C^{-1})$ donde $C = \begin{pmatrix} 2p & -a+u & 3u \\ 2q & -b+v & 3v \\ 2r & -c+w & 3w \end{pmatrix}$.

En primer lugar se tiene:

$$\det(2C^{-1}) = 2^3 \det(C^{-1}) = \frac{8}{\det(C)}.$$

Ahora, aplicamos las propiedades de los determinantes para expresar el determinante de C en función del determinante de A . Sacamos factor común a 2 en la primera columna y a 3 en la última:

$$\det(C) = 2 \cdot 3 \cdot \det \begin{pmatrix} p & -a+u & u \\ q & -b+v & v \\ r & -c+w & w \end{pmatrix}$$

Le restamos la tercer columna a la segunda:

$$\det(C) = 6 \cdot \det \begin{pmatrix} p & -a & u \\ q & -b & v \\ r & -c & w \end{pmatrix}$$

Cambiamos de signo la segunda columna (cambiando de signo del determinante):

$$\det(C) = -6 \cdot \det \begin{pmatrix} p & a & u \\ q & b & v \\ r & c & w \end{pmatrix}$$

Intercambiamos las dos primeras columnas (el determinante cambia de signo);

$$\det(C) = 6 \cdot \det \begin{pmatrix} a & p & u \\ b & q & v \\ c & r & w \end{pmatrix} = 6\det(A^t).$$

Finalmente el determinante de una matriz coincide con el de su traspuesta. Por tanto:

$$\det(C) = 6\det(A^t) = 6\det(A) = 6 \cdot 3 = 18.$$

y sustituyendo en la expresión de partida:

$$\det(2C^{-1}) = 2^3 \det(C^{-1}) = \frac{8}{\det(C)} = \frac{8}{18} = \frac{4}{9}.$$

IX.— *Calcular el siguiente determinante:*

$$\begin{vmatrix} 0 & x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ x_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ x_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n & 0 & 0 & \dots & 1 \end{vmatrix}$$

¿ Para qué valores reales de x_1, x_2, \dots, x_n se anula?.

Para hallar el determinante lo transformamos mediante operaciones elementales que conserven su valor. Sumaremos a la primera fila la segunda multiplicada por $-x_1$, la tercera por $-x_2$, la cuarta por $-x_3$ y así sucesivamente. Nos queda:

$$\begin{vmatrix} -x_1^2 - x_2^2 - \dots - x_n^2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ x_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ x_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n & 0 & 0 & \dots & 1 \end{vmatrix}$$

Es una matriz triangular; el determinante es el producto de los términos de la diagonal:

$$-x_1^2 - x_2^2 - \dots - x_n^2.$$

El determinante se anula cuando:

$$x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 = 0.$$

Pero como el cuadrado de un número es siempre no negativo, la única posibilidad para que se anule la suma de cuadrados es que todos los términos sean nulos, es decir:

$$x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0.$$

X.— Dados $n \in \mathbb{N}$ y $a, b \in \mathbb{R}$ se considera la matriz $A \in M_{n \times n}(\mathbb{R})$:

$$A = \begin{pmatrix} a+b & a & a & \dots & a & a \\ a & a+b & a & \dots & a & a \\ a & a & a+b & \dots & a & a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a & a & a & \dots & a+b & a \\ a & a & a & \dots & a & a+b \end{pmatrix}$$

- (i) Hallar $\det(A)$ en función de a, b, n .
(ii) Hallar $\text{rango}(A)$ en función de a, b, n .

Comenzamos haciendo operaciones elementales fila que conservan en rango y el determinante.

Restamos la primera columna a todas las demás:

$$\begin{pmatrix} a+b & -b & -b & \dots & -b & -b \\ a & b & 0 & \dots & 0 & 0 \\ a & 0 & b & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a & 0 & 0 & \dots & b & 0 \\ a & 0 & 0 & \dots & 0 & b \end{pmatrix}$$

Sumamos a la primera fila todas las demás:

$$\begin{pmatrix} na+b & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ a & b & 0 & \dots & 0 & 0 \\ a & 0 & b & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a & 0 & 0 & \dots & b & 0 \\ a & 0 & 0 & \dots & 0 & b \end{pmatrix}$$

La matriz es triangular. Por tanto su determinante es el producto de los términos de la diagonal:

$$\det(A) = (na + b)b^{n-1}.$$

El rango (dado que está escalonada por columnas) es el número de columna no nulas.

- Si $b = 0$ y $a = 0$, la matriz es la matriz nula. Por tanto $\text{rango}(A) = 0$.

- Si $b = 0$ y $a \neq 0$, todas las columnas (de la forma escalonada) excepto la primera son nulas. Por tanto $\text{rango}(A) = 1$.

- Si $b \neq 0$, las $n - 1$ últimas columnas son no nulas. El rango es al menos $n - 1$. La primera columna será nula dependiendo de si $an + b = 0$. Deducimos:

- Si $b \neq 0$ y $a = -b/n$ entonces $\text{rango}(A) = n - 1$.

- Si $b \neq 0$ y $a \neq -b/n$ entonces $\text{rango}(A) = n$.

XI.— Hallar el siguiente determinante para $n \geq 2$

$$A_n = \begin{vmatrix} x_1 + y_1 & x_1 + y_2 & x_1 + y_3 & \dots & x_1 + y_n \\ x_2 + y_1 & x_2 + y_2 & x_2 + y_3 & \dots & x_2 + y_n \\ x_3 + y_1 & x_3 + y_2 & x_3 + y_3 & \dots & x_3 + y_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n + y_1 & x_n + y_2 & x_n + y_3 & \dots & x_n + y_n \end{vmatrix}$$

Restamos a las filas 2, 3, ..., n la primera fila. Queda:

$$A_n = \begin{vmatrix} x_1 + y_1 & x_1 + y_2 & x_1 - x_1 & \cdots & x_1 - x_1 \\ x_2 - x_1 & x_2 - x_1 & x_2 - x_1 & \cdots & x_2 - x_1 \\ x_3 - x_1 & x_3 - x_1 & x_3 - x_1 & \cdots & x_3 - x_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n - x_1 & x_n - x_1 & x_n - x_1 & \cdots & x_n - x_1 \end{vmatrix}$$

Vemos que en cada fila 2, 3, ..., n los términos son iguales. Por las propiedades del determinante, podemos sacarlos fuera:

$$A_n = (x_2 - x_1)(x_3 - x_1) \cdots (x_n - x_1) \begin{vmatrix} x_1 + y_1 & x_1 + y_2 & x_1 - x_1 & \cdots & x_1 - x_1 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{vmatrix}$$

Entonces si $n > 2$, hay dos o más filas iguales y por tanto el determinante es 0.

Si $n = 2$ queda:

$$A_2 = (x_2 - x_1) \begin{vmatrix} x_1 + y_1 & x_1 + y_2 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = (x_2 - x_1)(y_1 - y_2)$$

(Primer parcial, febrero 2003)

XII.— Calcular en función de x el siguiente determinante:

$$\det \begin{pmatrix} 1 & x & x^2 & 1 \\ x & x^2 & 1 & 1 \\ x^2 & 1 & 1 & x \\ 1 & 1 & x & x^2 \end{pmatrix}$$

¿Para qué valores reales de x se anula?

Hacemos operaciones elementales para simplificar el determinante. Comenzamos sumando todas las fila a la primera:

$$\begin{aligned} & \det \begin{pmatrix} 2 + x + x^2 & 2 + x + x^2 & 2 + x + x^2 & 2 + x + x^2 \\ x & x^2 & 1 & 1 \\ x^2 & 1 & 1 & x \\ 1 & 1 & x & x^2 \end{pmatrix} = \\ & = (2 + x + x^2) \det \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x & x^2 & 1 & 1 \\ x^2 & 1 & 1 & x \\ 1 & 1 & x & x^2 \end{pmatrix} = \\ & = (2 + x + x^2) \det \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ x & x^2 - x & 1 - x & 1 - x \\ x^2 & 1 - x^2 & 1 - x^2 & x - x^2 \\ 1 & 0 & x - 1 & x^2 - 1 \end{pmatrix} = \\ & = (2 + x + x^2) \det \begin{pmatrix} x^2 - x & 1 - x & 1 - x \\ 1 - x^2 & 1 - x^2 & x - x^2 \\ 0 & x - 1 & x^2 - 1 \end{pmatrix} = \\ & = (2 + x + x^2)(x - 1)^3 \det \begin{pmatrix} x & -1 & -1 \\ -1 - x & -1 - x & -x \\ 0 & 1 & x + 1 \end{pmatrix} = \\ & = (2 + x + x^2)(x - 1)^3 \det \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ -1 - x - x^2 & -1 & -x \\ x^2 + x & -x & x + 1 \end{pmatrix} = \\ & = -(2 + x + x^2)(x - 1)^3 \det \begin{pmatrix} -1 - x - x^2 & -1 \\ x^2 + x & -x \end{pmatrix} = -(2 + x + x^2)(x - 1)^3 x(x^2 + 2x + 2) \end{aligned}$$

El determinante se anula en las raíces de cada factor:

$$2 + x + x^2 = 0 \iff x = \frac{-1 \pm \sqrt{1-4}}{2} \notin \mathbb{R}$$

$$x - 1 = 0 \iff x = 1$$

$$x = 0$$

$$x^2 + 2x + 2 = 0 \iff x = -1 \pm \sqrt{1-2} \notin \mathbb{R}$$

Es decir se anula para $x = 0$ ó $x = 1$.

XIII.— Dado $n \in \mathbb{N}$ se define la matriz $P_n \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$ como:

$$(P_n)_{ij} = \begin{cases} i & \text{si } i \leq j \\ 1 & \text{si } i > j \end{cases}$$

(i) Escribir la matriz P_4 y hallar su determinante.

Por la definición dada los elementos de la matriz uno si se encuentran en una fila mayor que la columna y valen el número de fila en el que están en otro caso. Por tanto:

$$P_4 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 4 \end{pmatrix}.$$

Hallaremos el determinante en general en el apartado siguiente.

(ii) Para cualquier $n \geq 2$, hallar $\det(P_n)$, $\text{traza}(P_n)$ y $\det(P_n^{-1})$.

Tenemos:

$$P_n = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 & \dots & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 3 & \dots & 3 & 3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & n-1 & n-1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & n \end{pmatrix}.$$

Para hallar el determinante a cada fila le restamos la primera.

$$\det(P_n) = \det \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & \dots & 2 & 2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & n-2 & n-2 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & n-1 \end{pmatrix} = 1 \cdot 1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot (n-1) = (n-1)!$$

Aplicado al apartado anterior:

$$\det(P_4) = (4-1)! = 3! = 6.$$

La traza es la suma de los elementos de la diagonal:

$$\text{traza}(P_n) = 1 + 2 + \dots + n = \frac{n(n+1)}{2}.$$

Por último:

$$\det(P_n^{-1}) = \det(P_n)^{-1} = \frac{1}{(n-1)!}.$$

XV.— Sean $A, B \in \mathcal{M}_{2 \times 2}(\mathbb{R})$. Razonar la falsedad o veracidad de las siguientes afirmaciones:

(i) Si $\text{rango}(A) = 1$ entonces $\text{rango}(AB) \leq 1$.

VERDADERO. Como $\text{rango}(A) = 1$ y $A \in \mathcal{M}_{2 \times 2}(\mathbb{R})$ se tiene que $\det(A) = 0$. Entonces:

$$\det(AB) = \det(A)\det(B) = 0 \cdot \det(B) = 0$$

y así $\text{rango}(AB) < 2$, es decir, $\text{rango}(AB) \leq 1$.

(ii) Si $\text{rango}(A) = \text{rango}(B)$ entonces $\text{rango}(AB) = \text{rango}(A)$.

FALSO. Por ejemplo si $A = B = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ entonces $\text{rango}(AB) = \text{rango}(0) = 0 \neq 1 = \text{rango}(A)$.

(iii) $\text{rango}(A) + \text{rango}(B) = \text{rango}(A + B)$.

FALSO. Por ejemplo si $A = B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ entonces $\text{rango}(A) + \text{rango}(B) = 2 + 2 = 4$ pero $\text{rango}(A + B) = 2$.

(iv) $\text{rango}(A) + \text{rango}(B) > \text{rango}(A + B)$.

FALSO. Por ejemplo si $A = B = 0$ entonces $\text{rango}(A) + \text{rango}(B) = 0 = \text{rango}(A + B)$.
