

Álgebra Lineal

Tema 1. Matrices

Grado en Ingeniería Informática

Doble Grado en Ingeniería Informática y Administración
de Empresas

AUTORES: J. SALAS, A. TORRENTE Y E.J.S. VILLASEÑOR

uc3m | Universidad **Carlos III** de Madrid



Índice general

1. Matrices	1
1.1. Algunas definiciones básicas	1
1.2. Operaciones con matrices	3
1.2.1. Suma de matrices	4
1.2.2. Producto por escalares	4
1.2.3. Producto de matrices	5
1.3. Traspuesta de una matriz	6
1.4. Inversa de una matriz cuadrada	7
1.5. Determinantes de matrices cuadradas	9
1.6. Matrices por bloques	12
1.7. Conjuntos inducidos por una matriz	16

Este curso de Álgebra Lineal para el Grado en Ingeniería Informática y el Doble Grado en Ingeniería Informática y Administración de Empresas está estructurado en 14 temas, idealmente correspondientes a las sesiones magistrales de una asignatura cuatrimestral. En los dos primeros temas se abordan conceptos conocidos para el estudiante que inicia el curso: matrices y sistemas de ecuaciones. Además de hacer un rápido recorrido por estos contenidos, se presentan y desarrollan algunos de los métodos que serán herramientas básicas a lo largo de los siguientes capítulos. En éstos, se estudian diversas nociones sobre los espacios vectoriales, las transformaciones lineales y la relación de éstas con las matrices. Se desarrollan los conceptos de valores y vectores propios y se plantea el problema de la diagonalización. La definición del producto interno permite introducir los conceptos de distancia y ortogonalidad. Finalmente y desde un punto de vista más numérico, se estudia el problema de mínimos cuadrados, la pseudoinversa de una matriz arbitraria y su descomposición en valores singulares.

En el texto se van a usar bloques de contenido con un código de colores para facilitar su comprensión. Los bloques en amarillo pálido contienen **definiciones**:

Definición

Los bloques en azul muestran **teoremas, proposiciones, etc.:**

Teorema

Finalmente, los bloques en gris muestran **ejemplos**:

Ejemplo

Aunque el texto es básicamente auto-contenido, se necesitarán algunas definiciones

previas (aprendidas en el bachillerato). Para facilitar la lectura de los primeros temas incluimos aquí alguna notación básica

- \mathbb{N} es el conjunto de los números naturales (que empiezan por el 1; es decir, el número 0 **no** es un número natural).
- \mathbb{Z} es el conjunto de los números enteros.
- \mathbb{Q} es el conjunto de los números racionales; es decir, números de la forma a/b donde $a, b \in \mathbb{Z}$ y $b \neq 0$.
- \mathbb{R} es el conjunto de los números reales.
- \mathbb{R}^n es el conjunto formado por las n -tuplas (a_1, a_2, \dots, a_n) donde cada $a_i \in \mathbb{R}$. En Cálculo se suele usar la notación anterior, pero en Álgebra Lineal normalmente escribiremos los elementos de \mathbb{R}^n como vectores columna:

$$\mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}.$$

A menudo escribiremos los vectores columna de la forma $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_n)^t$ para ahorrar espacio. El superíndice t significa *traspuesto/a* y aparecerá en el Tema 1.3.

Tema 1

Matrices

1.1. Algunas definiciones básicas

En este tema de introducción a la asignatura de Álgebra Lineal definimos algunas nociones y enunciamos algunas propiedades de las matrices, en su mayoría conocidas de cursos anteriores.

- Una **matriz de dimensión** $m \times n$ es una disposición rectangular en m filas y n columnas de números, reales o complejos, denominados *elementos* o *entradas*. Las matrices se suelen indicar con letras mayúsculas, mientras que los elementos de las mismas se denotan con letras minúsculas:

$$A = (a_{ij}) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}.$$

Así, el elemento (i, j) de la matriz, es decir, el que ocupa la posición dada por la i -ésima fila y la j -ésima columna, se representa mediante a_{ij} .

NOTA: en algunas ocasiones es más sencillo representar los elementos de la matriz A usando también letras mayúsculas; por ejemplo, $A = (A_{ij})$.

El conjunto de todas las matrices $m \times n$ con elementos reales se denota por $\mathbb{R}^{m \times n}$; el conjunto de todas las matrices $m \times n$ con elementos complejos se denota por $\mathbb{C}^{m \times n}$. Para referirnos en general a cualquiera de estos conjuntos escribiremos $\mathbb{K}^{m \times n}$.

También usaremos el término **escalar** para referirnos a un elemento del conjunto \mathbb{K} , ya sea éste \mathbb{R} ó \mathbb{C} . El símbolo \mathbb{K} representa en general un conjunto con la estructura algebraica de cuerpo. En este curso nos centraremos fundamentalmente en el cuerpo de los reales. La definición precisa de cuerpo se verá en el Tema 3.

- Una matriz de dimensión $m \times m$ se denomina **matriz cuadrada**.
- Una matriz de dimensión $m \times 1$, es decir, que consta de una única columna, a menudo se denomina *vector columna*; del mismo modo, una matriz de dimensión $1 \times m$, es decir, que consta de una única fila, se denomina *vector fila*. En ocasiones se simplifica la notación y escribiremos simplemente $A \in \mathbb{K}^m$.
- La **diagonal principal** de una matriz A de dimensión $m \times n$ está formada por los elementos de la forma a_{ii} , para $1 \leq i \leq \min\{m, n\}$.
- Una matriz cuadrada en la que todas las entradas que no están en la diagonal principal son iguales a cero se denomina **matriz diagonal**. Es decir, $a_{ij} = 0$ para todo $i \neq j$.
- Una matriz cuadrada cuyas entradas por encima de su diagonal principal son cero se llama **matriz triangular inferior**. Es decir, $a_{ij} = 0$ para todo $j > i$. Una matriz cuadrada cuyas entradas por debajo de su diagonal principal son cero se llama **matriz triangular superior**. Es decir, $a_{ij} = 0$ para todo $j < i$.

- Una matriz de dimensión $m \times n$ con todas las entradas iguales a cero se denomina **matriz cero** y la representamos por $0_{m \times n}$ (ó simplemente por 0 si las dimensiones se sobreentienden).
- Una matriz cuadrada de dimensión $n \times n$ con todas las entradas iguales a cero excepto las de la diagonal principal, que valen 1, se denomina **matriz identidad** y se representa mediante I_n (ó por I si las dimensiones se sobreentienden).
- Se llama **traza** de una matriz cuadrada A (y la denotamos por $\text{tr}(A)$) a la suma de los elementos de la diagonal principal:

$$\text{tr}(A) = \sum_{i=1}^m a_{ii} .$$

- Dados los vectores columna $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_p$, llamamos **combinación lineal** de estos vectores a una expresión de la forma: $\alpha_1 \mathbf{v}_1 + \alpha_2 \mathbf{v}_2 + \dots + \alpha_p \mathbf{v}_p$, donde $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$ son escalares. Decimos que los vectores $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_p$ son **linealmente independientes** si, de la expresión $\alpha_1 \mathbf{v}_1 + \dots + \alpha_p \mathbf{v}_p = 0$, se deduce que necesariamente $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_p = 0$.

Entonces, llamamos **rango de una matriz** A (y lo denotamos por $\text{rg}(A)$) al número de columnas linealmente independientes de la matriz. Este número coincide con el número de filas linealmente independientes de A.

1.2. Operaciones con matrices

A continuación describimos distintas operaciones que involucran matrices y enunciamos algunas de sus propiedades más importantes.

1.2.1. Suma de matrices

Dadas las matrices $A, B \in \mathbb{K}^{m \times n}$, definimos la **suma** de A y B , y la representamos por $A + B$, como la matriz de $\mathbb{K}^{m \times n}$ cuyo elemento (i, j) es $(A + B)_{ij} = a_{ij} + b_{ij}$.

Propiedades de la suma de matrices:

Si $A, B \in \mathbb{K}^{m \times n}$, entonces la suma de matrices satisface las propiedades:

1. Asociativa: $(A + B) + C = A + (B + C)$.
2. Conmutativa: $A + B = B + A$.
3. Elemento neutro: $A + 0_{m \times n} = 0_{m \times n} + A = A$.
4. Elemento inverso: Para toda matriz $A \in \mathbb{K}^{m \times n}$ existe el elemento inverso $-A$, dado por $-A = (-a_{ij})$, tal que $A + (-A) = (-A) + A = 0_{m \times n}$.

Por estas propiedades, se dice que $\mathbb{K}^{m \times n}$ con la operación suma tiene *estructura algebraica* de grupo conmutativo.

1.2.2. Producto por escalares

Dados el escalar (real o complejo) α y la matriz $A \in \mathbb{K}^{m \times n}$, definimos el **producto** del escalar α por A , y lo representamos por αA , mediante la matriz de $\mathbb{K}^{m \times n}$ cuyo elemento (i, j) es $(\alpha A)_{ij} = \alpha a_{ij}$.

Propiedades del producto de matrices por escalares:

Si $A, B \in \mathbb{K}^{m \times n}$ y $\alpha, \beta \in \mathbb{K}$, entonces el producto de matrices por escalares en $\mathbb{K}^{m \times n}$ satisface las siguientes propiedades:

1. $\alpha(AB) = (\alpha A)B = A(\alpha B)$.

2. Distributiva respecto a la suma de matrices: $\alpha(A + B) = \alpha A + \alpha B$.
3. Distributiva respecto a la suma de escalares: $(\alpha + \beta)A = \alpha A + \beta A$.
4. Identidad: dado $1 \in \mathbb{K}$, para toda matriz $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, se tiene que $1A = A$.

1.2.3. Producto de matrices

Dadas las matrices $A \in \mathbb{K}^{m \times n}$ y $B \in \mathbb{K}^{n \times p}$, donde el número n de columnas de A es igual al número de filas de B , el **producto** $C = AB$ existe y tiene dimensión $m \times p$ (aunque BA puede existir o no). Obsérvese que este producto normalmente se escribe sin el signo de multiplicación. Si $C = (c_{ij})$ escribimos:

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ik} b_{kj} = a_{i1} b_{1j} + a_{i2} b_{2j} + \cdots + a_{in} b_{nj}.$$

Es decir, el elemento c_{ij} del producto es el **producto escalar** de la i -ésima fila de A $(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$ y la j -ésima columna de B $(b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{nj})^t$.

Propiedades del producto de matrices:

- Asociativa: $(AB)C = A(BC)$.
- Elemento neutro (o unidad): $I_m A = A$ y $A I_n = A$ para toda matriz $A \in \mathbb{K}^{m \times n}$, siendo I_m, I_n las matrices identidad de dimensiones $m \times m$ y $n \times n$, respectivamente.
- La multiplicación de matrices no es conmutativa en general, es decir *normalmente* $AB \neq BA$, incluso si las matrices A y B son cuadradas.
- No toda matriz tiene inversa. Para tener inversa, una matriz tiene que ser cuadrada, pero no toda matriz cuadrada tiene inversa.

- Propiedad distributiva respecto de la suma: $A(B+C) = AB+AC$ (por la izquierda) y $(B+C)A = BA+CA$ (por la derecha).
- $A O_{n \times p} = O_{m \times p}$ y $O_{p \times m} A = O_{p \times n}$ para toda matriz $A \in \mathbb{K}^{m \times n}$.

Una matriz A de dimensión $n \times n$ que verifica $AA = A$ (escrito también como $A^2 = A$) se denomina **idempotente**. Estas matrices están relacionadas con las aplicaciones lineales que se denominan **proyectores** (ver Tema 6).

1.3. Traspuesta de una matriz

Cualquier matriz $A = (a_{ij}) \in \mathbb{K}^{m \times n}$ tiene una única matriz **traspuesta**, representada por A^t , de tamaño $n \times m$, cuyo elemento (i, j) se define por $(A^t)_{ij} = a_{ji}$.

Obviamente, la primera fila de A es la primera columna de A^t ; la segunda fila de A es la segunda columna de A^t y así sucesivamente.

Propiedades de la traspuesta:

- $(A^t)^t = A$.
- $(A + B)^t = A^t + B^t$.
- $(\alpha A)^t = \alpha A^t$.
- $(AB)^t = B^t A^t$.

La matriz A se dice **simétrica** si $A = A^t$. La matriz A se dice **antisimétrica** si $A = -A^t$. Obviamente, las matrices simétricas y antisimétricas son cuadradas.

Dada la matriz $A \in \mathbb{K}^{m \times n}$, podemos calcular otras matrices relacionadas con ella.

Las matrices $A^t A$ y $A A^t$ son simétricas.

Demostración.

$$(A^t A)^t = A^t (A^t)^t = A^t A,$$

$$(A A^t)^t = (A^t)^t A^t = A A^t.$$

□

La matriz $A^t A$ será de gran importancia en los Temas 13 y 14 del curso.

Además dada la matriz *cuadrada* $A \in \mathbb{K}^{n \times n}$, se tiene que:

La matriz $A + A^t$ es simétrica y la matriz $A - A^t$ es antisimétrica.

Demostración.

$$(A + A^t)^t = A^t + (A^t)^t = A^t + A = A + A^t,$$

$$(A - A^t)^t = A^t - (A^t)^t = A^t - A = -(A - A^t).$$

□

1.4. Inversa de una matriz cuadrada

Consideremos una matriz cuadrada A de dimensión $n \times n$. Si A tiene rango n , se dice que A es **no singular**; si su rango es menor que n , la llamaremos matriz **singular**. En el caso de que A sea no singular, podemos asociarle una matriz especial denominada *matriz inversa*.

Toda matriz cuadrada $A \in \mathbb{K}^{n \times n}$ no singular (i.e., de rango n) tiene una matriz **inversa**, de dimensión $n \times n$, denotada por A^{-1} , que satisface:

$$A A^{-1} = A^{-1} A = I_n.$$

Una matriz con inversa se dice que es **invertible**.

Propiedades de la matriz inversa:

- Si la matriz A tiene inversa A^{-1} , ésta es única.
- Si A y B son matrices invertibles de dimensión $n \times n$, entonces $A B$ es invertible y $(A B)^{-1} = B^{-1} A^{-1}$.
- Si A es invertible entonces A^{-1} es invertible y $(A^{-1})^{-1} = A$.
- Si A es invertible entonces A^t es invertible y $(A^t)^{-1} = (A^{-1})^t$.
- Si A es invertible y α es un escalar no nulo, entonces αA es invertible y $(\alpha A)^{-1} = \alpha^{-1} A^{-1}$ donde α^{-1} es el único elemento inverso (multiplicativo) de $\alpha \in \mathbb{K}$.
- A es no singular si y sólo si A es invertible.
- Si A y B son matrices cuadradas de dimensión $n \times n$, el producto $A B$ es no singular si y sólo si A y B son las dos no singulares.

Veamos algunas definiciones que necesitaremos en temas posteriores:

- Si A es una matriz de dimensión $m \times n$ tal que $A^t A = I_n$, decimos que A es **ortogonal**. Como consecuencia, si A es una matriz ortogonal cuadrada de dimensión $n \times n$, entonces A es no singular y $A^{-1} = A^t$.

- Dos matrices $A, B \in \mathbb{K}^{m \times n}$ son **equivalentes** si existen matrices *invertibles* P y Q tales que $B = P A Q^{-1}$ o bien que $B = P^{-1} A Q$.
- Dos matrices cuadradas $A, B \in \mathbb{K}^{n \times n}$ se dicen **semejantes** si existe una matriz *invertible* P tal que $B = P^{-1} A P \Leftrightarrow A = P B P^{-1}$.

1.5. Determinantes de matrices cuadradas

Toda matriz *cuadrada* $A \in \mathbb{K}^{n \times n}$ tiene asociado un determinante, denotado por $\det(A)$ ó $|A|$, que es un elemento de \mathbb{K} calculado a partir de los elementos de la matriz. El valor numérico del mismo se obtiene por medio de un algoritmo recursivo; esto quiere decir que el cálculo del determinante de una matriz de dimensión $n \times n$ está definida en función de los determinantes de matrices de dimensión $(n - 1) \times (n - 1)$ y éstos en función de los determinantes de matrices de dimensión $(n - 2) \times (n - 2)$ y así sucesivamente hasta alcanzar matrices de dimensión 2×2 , para las que el determinante se calcula con una fórmula. Para describir con detalle el cálculo, necesitamos las siguientes definiciones.

Dada una matriz $A = (a_{ij}) \in \mathbb{K}^{n \times n}$ el **menor** (i, j) de A , denotado por M_{ij}^A , es la matriz de $\mathbb{K}^{(n-1) \times (n-1)}$ que se obtiene de A al eliminar la i -ésima fila y la j -ésima columna. El **cofactor** de a_{ij} , denotado por C_{ij}^A , se define mediante la fórmula

$$C_{ij}^A = (-1)^{i+j} \det(M_{ij}^A) .$$

Desarrollo de Laplace

Dada una matriz $A = (a_{ij}) \in \mathbb{K}^{n \times n}$ se tiene:

1. Para cualquier fila $1 \leq i \leq n$, $\det(A) = \sum_{j=1}^n a_{ij} C_{ij}^A$.

2. Para cualquier columna $1 \leq j \leq n$, $\det(A) = \sum_{i=1}^n a_{ij} C_{ij}^A$.

Este desarrollo nos proporciona el siguiente método para el cálculo del determinante.

- Para una matriz

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$$

de dimensión 2×2 el determinante se calcula mediante:

$$\det(A) = ad - bc.$$

- Para una matriz $A = (a_{ij})$ de dimensión 3×3 el determinante se puede calcular mediante:

$$\det(A) = a_{11} C_{11}^A + a_{12} C_{12}^A + a_{13} C_{13}^A.$$

Pero también puede calcularse con el mismo proceso aplicado a cualquier fila o columna: por ejemplo mediante $\det(A) = a_{21} C_{21}^A + a_{22} C_{22}^A + a_{23} C_{23}^A$ ó mediante $\det(A) = a_{13} C_{13}^A + a_{23} C_{23}^A + a_{33} C_{33}^A$.

- Para matrices de dimensión mayor se utiliza la misma fórmula de manera recursiva. Por ejemplo, si $A = (a_{ij})$ es 4×4 , evaluando con la primera fila tendremos:

$$\det(A) = a_{11} C_{11}^A + a_{12} C_{12}^A + a_{13} C_{13}^A + a_{14} C_{14}^A,$$

donde cada uno de los cofactores $C_{11}^A, C_{12}^A, C_{13}^A, C_{14}^A$ se obtiene con la definición del determinante de una matriz 3×3 , etc. Este método no es muy eficiente. Un método mejor consiste en utilizar las propiedades del determinante que se enuncian a continuación.

Propiedades de los determinantes:

Dadas la matriz cuadrada $A \in \mathbb{K}^{n \times n}$ y los escalares $\alpha, \beta \in \mathbb{K}$, se tiene:

1. Si A tiene dos filas o dos columnas iguales, $\det(A) = 0$.
2. $\det(I_n) = 1$.
3. Para todo $1 \leq i \leq n$, el determinante es una **función lineal** de la i -ésima columna.

Es decir

$$\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & \alpha a_{1i} + \beta b_{1i} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & \alpha a_{2i} + \beta b_{2i} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & \alpha a_{ni} + \beta b_{ni} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = \alpha \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1i} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2i} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{ni} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} + \beta \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & b_{1i} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & b_{2i} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & b_{ni} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}$$

Igualmente, el determinante es una **función lineal** de la i -ésima fila.

De estas propiedades básicas se pueden probar muchas más: si $A, B \in \mathbb{K}^{n \times n}$ y $\alpha \in \mathbb{K}$, entonces:

1. $\det(A) = 0$ si y sólo si A es singular.

2. $\det(A B) = \det(A) \det(B)$.
3. $\det(A^t) = \det(A)$.
4. Si la matriz D se obtiene al intercambiar entre sí dos filas o dos columnas de A , entonces $\det(D) = -\det(A)$.
5. Si la matriz D se obtiene al multiplicar una fila o columna de A por un escalar $\alpha \in \mathbb{K}$, entonces $\det(D) = \alpha \det(A)$. Luego $\det(\alpha A) = \alpha^n \det(A)$.
6. Si la matriz D se obtiene a partir de la matriz A sumando a una fila cualquiera de A una combinación lineal del resto de las filas de A , entonces $\det(D) = \det(A)$. Lo mismo ocurre si consideramos las columnas de A .
7. Si A^{-1} existe entonces $\det(A^{-1}) = \frac{1}{\det(A)}$.
8. Si A^{-1} existe entonces $A^{-1} = \frac{1}{\det(A)} \times \text{adj}(A)$, donde $\text{adj}(A)$ es la **matriz adjunta de A** que se obtiene sustituyendo cada entrada en A por su cofactor y después trasponiendo la matriz resultante.

1.6. Matrices por bloques

En ocasiones, es particularmente útil “descomponer” matrices con un gran número de filas o columnas en otras más pequeñas, a veces solamente para ahorrar espacio y a veces por la importante ventaja de que permite resolver problemas más pequeños que el original de manera más sencilla. Estas submatrices se denominan **bloques**, se denotan por A_{ij} y se construyen trazando rectas verticales y horizontales imaginarias entre las

filas y columnas de A :

$$A = \left(\begin{array}{c|c|c|c} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} & \dots & \mathbf{A}_{1s} \\ \hline \vdots & \vdots & & \vdots \\ \hline \mathbf{A}_{r1} & \mathbf{A}_{r2} & \dots & \mathbf{A}_{rs} \end{array} \right).$$

NOTA: se ha usado una notación distinta para los bloques \mathbf{A}_{ij} que para los elementos de matriz A_{ij} escalares. Sin embargo, hay que advertir que, en algunos casos, se considerarán bloques de tamaño 1×1 (es decir, escalares) y se podrá usar cualquiera de las dos notaciones, dependiendo del contexto.

Ejemplo

Podemos descomponer la matriz A de dimensión 5×4 , por ejemplo, en 2×2 bloques, como sigue:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 & 3 \\ 2 & 4 & 0 & 7 \\ 3 & 5 & 3 & 8 \\ 4 & 2 & 6 & 3 \\ 5 & 6 & -3 & 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{pmatrix}.$$

Esto permite, por ejemplo, realizar operaciones entre matrices descompuestas en bloques de dimensiones adecuadas:

- **Suma:** para sumar las matrices A y B , descompuestas en bloques \mathbf{A}_{ij} y \mathbf{B}_{ij} y cuyas dimensiones son iguales para todo i, j , entonces

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B})_{ij} = \mathbf{A}_{ij} + \mathbf{B}_{ij}.$$

- **Producto:** el producto de las matrices A y B , descompuestas en bloques, se puede efectuar siguiendo la regla usual de su multiplicación, considerando a las submatri-

ces como elementos:

$$(\mathbf{A}\mathbf{B})_{ij} = \mathbf{A}_{i1}\mathbf{B}_{1j} + \mathbf{A}_{i2}\mathbf{B}_{2j} + \cdots + \mathbf{A}_{in}\mathbf{B}_{nj},$$

siempre y cuando las operaciones estén bien definidas, es decir, cuando los bloques tengan las dimensiones adecuadas.

Ejemplo

Podemos multiplicar las matrices

$$\mathbf{A} = \left(\begin{array}{ccc|c} 0 & 2 & -3 & 4 \\ 8 & -4 & 0 & 1 \\ 3 & 2 & -3 & 0 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|c} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{array} \right),$$

$$\mathbf{B} = \left(\begin{array}{c|ccc} 4 & 2 & 6 & 3 \\ 0 & 2 & -1 & -3 \\ -2 & 2 & 0 & 1 \\ \hline 2 & -1 & 3 & 6 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|c} \mathbf{B}_{11} & \mathbf{B}_{12} \\ \mathbf{B}_{21} & \mathbf{B}_{22} \end{array} \right)$$

por bloques como sigue:

$$\mathbf{A}\mathbf{B} = \left(\begin{array}{ccc|ccc} \mathbf{A}_{11}\mathbf{B}_{11} + \mathbf{A}_{12}\mathbf{B}_{21} & & & \mathbf{A}_{11}\mathbf{B}_{12} + \mathbf{A}_{12}\mathbf{B}_{22} & & \\ \mathbf{A}_{21}\mathbf{B}_{11} + \mathbf{A}_{22}\mathbf{B}_{21} & & & \mathbf{A}_{21}\mathbf{B}_{12} + \mathbf{A}_{22}\mathbf{B}_{22} & & \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|ccc} 14 & -6 & 10 & 15 \\ 34 & 7 & 55 & 42 \\ 18 & 4 & 16 & 0 \end{array} \right).$$

Obviamente el resultado es el mismo que el que se obtiene sin usar bloques, pero se opera con matrices más pequeñas, lo cual supone una ventaja, por ejemplo, desde un punto de vista computacional.

De la misma manera, se pueden obtener la traspuesta o la inversa de una matriz por bloques o definir conceptos muy útiles en el álgebra lineal como las matrices diagonales por bloques.

- Una matriz cuadrada A descompuesta en bloques en la que todos los bloques que no están en la diagonal principal son iguales a cero se denomina **matriz diagonal por bloques**. Es decir, $\mathbf{A}_{ij} = \mathbf{0}$ para todo $i \neq j$:

$$A = \left(\begin{array}{c|c|c|c} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{A}_{22} & \dots & \mathbf{0} \\ \hline \vdots & \vdots & & \vdots \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{A}_{rr} \end{array} \right).$$

En esta expresión $\mathbf{0}$ representa bloques con la dimensión adecuada y cuyas entradas son todas iguales al escalar $0 \in \mathbb{K}$.

- Una matriz A cuadrada descompuesta en bloques en la que los bloques por encima de su diagonal principal son cero se llama **matriz triangular inferior por bloques**. Es decir, $\mathbf{A}_{ij} = \mathbf{0}$ para todo $j > i$. Una matriz cuadrada B descompuesta en bloques en la que los bloques por debajo de su diagonal principal son cero se llama **matriz triangular superior por bloques**. Es decir, $\mathbf{B}_{ij} = \mathbf{0}$ para todo $j < i$.

$$A = \left(\begin{array}{c|c|c|c} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} & \dots & \mathbf{0} \\ \hline \vdots & \vdots & & \vdots \\ \hline \mathbf{A}_{r1} & \mathbf{A}_{r2} & \dots & \mathbf{A}_{rr} \end{array} \right), \quad B = \left(\begin{array}{c|c|c|c} \mathbf{B}_{11} & \mathbf{B}_{12} & \dots & \mathbf{B}_{1r} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{B}_{22} & \dots & \mathbf{B}_{2r} \\ \hline \vdots & \vdots & & \vdots \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{B}_{rr} \end{array} \right).$$

- Para las matrices triangulares (superior e inferior) por bloques A , así como para todas las matrices diagonales por bloques, se cumple que:

$$\operatorname{tr}(A) = \sum_{k=1}^r \operatorname{tr}(\mathbf{A}_{kk}), \quad \det(A) = \prod_{k=1}^r \det(\mathbf{A}_{kk}).$$

1.7. Conjuntos inducidos por una matriz

En esta sección vamos a estudiar cuatro importantes conjuntos asociados a cualquier matriz $A \in \mathbb{K}^{m \times n}$; dos de ellos, son subconjuntos de \mathbb{K}^m y los otros dos son subconjuntos de \mathbb{K}^n . En temas posteriores, veremos muchas propiedades interesantes de estos conjuntos; de momento nos limitamos a aprender a calcularlos.

Espacio nulo

Dada una matriz A de dimensión $m \times n$, su **espacio nulo** $N(A)$ es el conjunto de todos los elementos \mathbf{v} de \mathbb{K}^n que verifican que el producto $A\mathbf{v}$ es el elemento $\mathbf{0}$ de \mathbb{K}^m .

NOTA: obsérvese que las dimensiones de las matrices y los vectores mencionados en la definición son las necesarias para que la multiplicación tenga sentido.

Espacio columna

Dada la matriz $A \in \mathbb{K}^{m \times n}$, con columnas denotadas por $(\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3, \dots, \mathbf{A}_n)$, su **espacio columna**, denotado por $\mathcal{C}(A)$, es el subconjunto de \mathbb{K}^m que contiene todas las combinaciones lineales de las columnas de A .

Espacio fila

El **espacio fila** de $A \in \mathbb{K}^{m \times n}$ es el conjunto de \mathbb{K}^n formado por todas las combinaciones lineales de las filas de A . Lo denotamos por $\mathcal{C}(A^t)$.

NOTA: obsérvese que usamos la notación anterior para enfatizar que el espacio fila de A es el espacio columna de su traspuesta. Finalmente:

Espacio nulo de la traspuesta

El **espacio nulo de la traspuesta** es, obviamente, el espacio nulo de la matriz traspuesta A^t y lo denotamos por $N(A^t)$. A veces se denomina *espacio nulo izquierdo*.

Si resolvemos $A^t \mathbf{v} = \mathbf{0}$, podemos traspasar ambos miembros y obtener $\mathbf{v}^t A = \mathbf{0}^t$. Esto indica que el espacio nulo de la traspuesta es el conjunto de vectores (fila) que al multiplicar a la matriz A por la izquierda producen el vector fila con todas las componentes nulas.

Ejemplo

Sea la matriz

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 0 \\ 2 & -4 & 0 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 3}.$$

Vamos a determinar los cuatro espacios asociados.

- 1) **Espacio Nulo:** $N(A) = \{\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3 : A \mathbf{v} = \mathbf{0}\}$. Si escribimos $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3)^t$, la condición $A \mathbf{v} = \mathbf{0}$, es decir,

$$\begin{pmatrix} 1 & -2 & 0 \\ 2 & -4 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

representa un sistema de dos ecuaciones y tres incógnitas v_1, v_2 y v_3 tal y como resulta al multiplicar las matrices e igualar componente a componente:

$$\begin{cases} v_1 - 2v_2 = 0, \\ 2v_1 - 4v_2 + v_3 = 0. \end{cases}$$

Al resolver el sistema nos queda $v_3 = 0$ y $v_1 = -2v_2$, donde v_2 actúa como parámetro. Por tanto, el espacio nulo de A es:

$$N(A) = \{\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3 : \mathbf{v} = v_2 (-2, 1, 0)^t, \quad v_2 \in \mathbb{R}\},$$

es decir, los elementos de $N(A)$ son aquellos elementos de \mathbb{R}^3 en los que la primera coordenada es igual al doble de la segunda y cambiada de signo y la tercera coordenada es cero.

- 2) **Espacio columna:** $\mathcal{C}(A) = \{\mathbf{v} \in \mathbb{R}^2: \mathbf{v} = \alpha_1 \mathbf{A}_1 + \alpha_2 \mathbf{A}_2 + \alpha_3 \mathbf{A}_3, \alpha_i \in \mathbb{R}\}$ es el conjunto de vectores que son combinación lineal de las columnas \mathbf{A}_i de la matriz A . Si observamos las columnas 1 y 2, vemos que una es múltiplo de la otra, por tanto, una combinación lineal de todas las columnas puede ser reducida a una combinación lineal de sólo A_1 y A_3 (ó de sólo A_2 y A_3):

$$\begin{aligned} \mathcal{C}(A) &= \{\mathbf{v} \in \mathbb{R}^2: \mathbf{v} = \alpha_1 \mathbf{A}_1 + \alpha_3 \mathbf{A}_3, \alpha_1, \alpha_3 \in \mathbb{R}\} \\ &= \{\mathbf{v} \in \mathbb{R}^2: \mathbf{v} = \alpha_1(1, 2)^t + \alpha_3(0, 1)^t, \alpha_1, \alpha_3 \in \mathbb{R}\} \\ &= \{\mathbf{v} \in \mathbb{R}^2: \mathbf{v} = (\alpha_1, 2\alpha_1 + \alpha_3)^t, \alpha_1, \alpha_3 \in \mathbb{R}\}. \end{aligned}$$

Si observamos cada una de las componentes de los elementos de $\mathcal{C}(A)$ descubrimos que obviamente la primera, α_1 , puede ser cualquier número real, pero también la segunda coordenada puede ser cualquier real. Por tanto, es fácil ver que $\mathcal{C}(A)$ coincide con \mathbb{R}^2 .

- 3) **Espacio fila:** Los elementos de $\mathcal{C}(A^t)$ se describen como combinaciones lineales de las dos filas de la matriz A , ya que éstas no son una múltiplo de la otra:

$$\begin{aligned} \mathcal{C}(A^t) &= \{\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3: \mathbf{v} = \beta_1(1, -2, 0)^t + \beta_2(2, -4, 1)^t, \beta_1, \beta_2 \in \mathbb{R}\} \\ &= \{\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3: \mathbf{v} = (\beta_1 + 2\beta_2, -2(\beta_1 + 2\beta_2), \beta_2)^t, \beta_1, \beta_2 \in \mathbb{R}\}. \end{aligned}$$

Obsérvese que todos los elementos de este conjunto cumplen que la segunda coordenada es igual a la primera multiplicada por -2 y que la tercera coordenada puede ser cualquier valor. Esto significa que también podemos escribir:

$$\mathcal{C}(A^t) = \{\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3: \mathbf{v} = (\beta_1, -2\beta_1, \beta_2)^t, \beta_1, \beta_2 \in \mathbb{R}\}.$$

4) **Espacio nulo de la traspuesta:** $N(A^t)$ es el conjunto de vectores de la forma $\mathbf{v} = (v_1, v_2)^t$ que satisfacen $A^t \mathbf{v} = \mathbf{0}$. Por tanto

$$\begin{aligned} N(A^t) &= \left\{ \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2 : \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -2 & -4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} \\ &= \{(v_1, v_2)^t \in \mathbb{R}^2 : v_1 + 2v_2 = 0, v_2 = 0\} \\ &= \{(v_1, v_2)^t \in \mathbb{R}^2 : v_1 = v_2 = 0\} = \{(0, 0)^t\}, \end{aligned}$$

esto es, el espacio nulo de la traspuesta sólo contiene un elemento: el vector $\mathbf{0}$ de \mathbb{R}^2 .

En capítulos posteriores veremos formas sistemáticas para calcular estos conjuntos y para dar expresiones compactas de los mismos.