

Geometría II

Examen XIV

FACULTAD
DE
CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE GRANADA



Los Del DGIIM, losdeldgiim.github.io

Doble Grado en Ingeniería Informática y Matemáticas
Universidad de Granada



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

Eres libre de compartir y redistribuir el contenido de esta obra en cualquier medio o formato, siempre y cuando des el crédito adecuado a los autores originales y no persigas fines comerciales.

Geometría II

Examen XIV

Los Del DGIIM, losdeldgiim.github.io

Daniel Arias Calero

Granada, 2025

Asignatura Geometría II.

Curso Académico 2024-2025.

Grado Doble Grado en Ingeniería Informática y Matemáticas.

Grupo Único.

Profesor Antonio Ros Mulero.

Descripción Convocatoria Extraordinaria.

Fecha 9 de Julio de 2025.

Duración 3 horas.

Ejercicio 1 (2 puntos). Demuestra que las matrices A y B tienen el mismo polinomio característico, pero una de ellas diagonaliza y la otra no.

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 2 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 3 & 1 & -1 \\ 0 & 2 & 0 \\ -1 & -1 & 3 \end{pmatrix}$$

Ejercicio 2 (4 puntos). Sea g una métrica euclídea sobre \mathbb{R}^3 tal que el endomorfismo f dado por

$$f(x, y, z) = (y, y - z, -x + y)$$

es una isometría de (\mathbb{R}^3, g) . Se pide:

- (a) Razonar que f^2 es la simetría respecto de un subespacio U .
- (b) Calcular el subespacio ortogonal U^\perp .
- (c) Razonar que f es un giro de ángulo $\pi/2$ y encontrar una base ortogonal de g .
- (d) Dar una matriz, respecto de la base usual de (\mathbb{R}^3) , de una de las métricas de g .

Ejercicio 3 (4 puntos). Se considera la siguiente matriz con coeficientes reales:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a & 1 \\ 0 & 1 & a \end{pmatrix}$$

Sea g_a la métrica de \mathbb{R}^3 cuya matriz en la base usual es A . Sea f el endomorfismo de \mathbb{R}^3 cuya matriz en la base usual es también A .

- (a) Calcular la signatura y clasificar la métrica g_a según los valores de a .
- (b) Para $a = 1$ obtener una base conjugada (es decir, ortogonal) para la métrica g_1 .
- (c) ¿Para qué valores de a es g_a una métrica euclídea y f autoadjunto en (\mathbb{R}^3, g_a) ?
- (d) Para $a = 2$ calcular, si es posible, una base ortogonal de (\mathbb{R}^3, g_2) formada por vectores propios de f .

Ejercicio 1 (2 puntos). Demuestra que las matrices A y B tienen el mismo polinomio característico, pero una de ellas diagonaliza y la otra no.

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 2 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 3 & 1 & -1 \\ 0 & 2 & 0 \\ -1 & -1 & 3 \end{pmatrix}$$

1. Cálculo del polinomio característico de A

$$\begin{aligned} P_A(\lambda) &= \det(A - \lambda I) = \begin{vmatrix} 3 - \lambda & 1 & 0 \\ 1 & 3 - \lambda & 2 \\ 0 & 0 & 2 - \lambda \end{vmatrix} \\ &= (2 - \lambda) \cdot \begin{vmatrix} 3 - \lambda & 1 \\ 1 & 3 - \lambda \end{vmatrix} = (2 - \lambda) ((3 - \lambda)^2 - 1) \\ &= (2 - \lambda) (\lambda^2 - 6\lambda + 8) = -(\lambda - 2)^2(\lambda - 4) \end{aligned}$$

2. Cálculo del polinomio característico de B

$$\begin{aligned} P_B(\lambda) &= \det(B - \lambda I) = \begin{vmatrix} 3 - \lambda & 1 & -1 \\ 0 & 2 - \lambda & 0 \\ -1 & -1 & 3 - \lambda \end{vmatrix} \\ &= (2 - \lambda) \begin{vmatrix} 3 - \lambda & -1 \\ -1 & 3 - \lambda \end{vmatrix} = (2 - \lambda) ((3 - \lambda)^2 - 1) \\ &= (2 - \lambda) (\lambda^2 - 6\lambda + 8) = -(\lambda - 2)^2(\lambda - 4) \end{aligned}$$

Ambas matrices tienen el mismo polinomio característico, veamos la diagonalización.

3. Subespacio propio de A

$\lambda = 2$:

$$\begin{aligned} V_2^A &= \left\{ \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \mid (A - 2I) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = 0 \right\} \\ &= \left\{ \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \mid \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = 0 \right\} \\ &= \left\{ \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \mid \begin{array}{l} x_1 + x_2 = 0 \\ x_1 + x_2 + 2x_3 = 0 \end{array} \right\} = \mathcal{L} \left(\begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right) \\ \dim V_2^A &= 1 < 2 \quad \Rightarrow \quad A \text{ no es diagonalizable.} \end{aligned}$$

4. Subespacio propio de B

$\lambda = 4$:

$$\begin{aligned}
V_4^B &= \left\{ \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \mid (B - 4I) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = 0 \right\} \\
&= \left\{ \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \mid \begin{pmatrix} -1 & 1 & -1 \\ 0 & -2 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = 0 \right\} \\
&= \left\{ \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \mid \begin{array}{l} x_2 = 0 \\ x_1 = -x_3 \end{array} \right\} = \mathcal{L} \left(\begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right) \\
&\Rightarrow \dim V_4^B = 1 = \text{multiplicidad algebraica}
\end{aligned}$$

$\lambda = 2$:

$$\begin{aligned}
V_2^B &= \left\{ \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \mid (B - 2I) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = 0 \right\} \\
&= \left\{ \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \mid \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = 0 \right\} \\
&= \left\{ \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \mid x_1 + x_2 - x_3 = 0 \right\} \\
\Rightarrow V_2^B &= \mathcal{L} \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \right) \Rightarrow \dim V_2^B = 2 = \text{multiplicidad algebraica}
\end{aligned}$$

Conclusión:

Ambas matrices tienen el mismo polinomio característico, pero B es diagonalizable y A no.

Ejercicio 2 (4 puntos). Sea g una métrica euclídea sobre \mathbb{R}^3 tal que el endomorfismo f dado por

$$f(x, y, z) = (y, y - z, -x + y)$$

es una isometría de (\mathbb{R}^3, g) . Se pide:

- (a) Razonar que f^2 es la simetría respecto de un subespacio U .

Para analizar la transformación compuesta $f \circ f$, calculamos la matriz asociada a dicha composición en la base canónica de \mathbb{R}^3 . Si llamamos

$$A = M(f, \mathcal{B}_u) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

entonces la matriz de $f \circ f$ se obtiene como:

$$B = M(f \circ f, \mathcal{B}_u) = A \cdot A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Procedemos ahora a calcular el polinomio característico de B :

$$p_{f \circ f}(\lambda) = \det(B - \lambda I) = \begin{vmatrix} -\lambda & 1 & -1 \\ 1 & -\lambda & -1 \\ 0 & 0 & -1 - \lambda \end{vmatrix} = (-1 - \lambda) \begin{vmatrix} -\lambda & 1 \\ 1 & -\lambda \end{vmatrix} = (-1 - \lambda)(\lambda^2 - 1).$$

$$\Rightarrow p_{f \circ f}(\lambda) = -(\lambda - 1)(\lambda + 1)^2.$$

Así, los valores propios de $f \circ f$ son $\{1, -1\}$, siendo -1 con multiplicidad doble.

Comprobamos ahora si la dimensión del espacio propio asociado a -1 coincide con su multiplicidad algebraica. Para ello, estudiamos el núcleo de $B + I$:

$$B + I = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \text{rang}(B + I) = 1.$$

$$\Rightarrow \dim(\ker(B + I)) = 3 - 1 = 2.$$

Dado que la dimensión del subespacio propio coincide con la multiplicidad algebraica del valor propio -1 , y que el valor propio 1 es simple, concluimos que $f \circ f$ es diagonalizable.

Por tanto, $f \circ f$ es semejante a una matriz diagonal de la forma:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

que representa una simetría respecto a una recta del subespacio U .

(b) Calcular el subespacio ortogonal U^\perp .

Como la transformación $f \circ f$ actúa como una simetría respecto a una recta, podemos descomponer el espacio en la suma directa $\mathbb{R}^3 = U \oplus U^\perp$, donde U es el subespacio fijo por $f \circ f$, es decir:

$$U = \left\{ (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \right\}.$$

Equivalente a resolver el sistema $(B - I)\vec{x} = 0$:

$$\begin{pmatrix} -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} -x + y - z = 0 \\ x - y - z = 0 \\ -2z = 0 \end{cases} \Rightarrow \mathcal{L}\{(1, 1, 0)\}.$$

Por tanto, el subespacio U es generado por el vector $(1, 1, 0)$.

Para hallar su ortogonal U^\perp , basta con calcular el subespacio propio asociado al valor propio -1 . Este viene dado por:

$$U^\perp = \left\{ (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid (B + I) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \vec{0} \right\},$$

$$B + I = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow x + y - z = 0.$$

Una base del subespacio solución es $\mathcal{L}\{(1, 0, 1), (1, -1, 0)\}$.

- (c) Razonar que f es un giro de ángulo $\pi/2$ y encontrar una base ortogonal de g .

Calculamos la traza de la matriz $A = M(f, \mathcal{B}_u)$:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \text{tr}(A) = 1$$

En \mathbb{R}^3 , si f es una isometría ortogonal con $\det(f) = 1$ y tiene traza 1, entonces f es un giro de ángulo θ tal que la matriz asociada:

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

La traza de esta matriz es:

$$\text{tr}(G) = 1 + 2 \cos \theta$$

$$\text{tr}(f) = 1 + 2 \cos \theta \quad \Rightarrow \quad 1 = 1 + 2 \cos \theta \Rightarrow \cos \theta = 0 \Rightarrow \theta = \frac{\pi}{2}$$

Vamos ahora a determinar el eje del giro, que corresponde al subespacio propio asociado a valor propio $\lambda = 1$. Calculamos:

$$V_1 = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \mid (A - I) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = 0 \right\}$$

$$A - I = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} -x + y = 0 \\ -z = 0 \\ -x + y - z = 0 \end{cases} \Rightarrow \mathcal{L} \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right)$$

El eje del giro es el subespacio propio asociado al valor propio $\lambda = 1$, generado por el vector:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Buscamos ahora una base ortogonal del plano perpendicular a este eje. Para ello, consideramos los vectores $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$ ortogonales a $(1, 1, 0)$, es decir:

$$(1 \ 1 \ 0) \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = x + y = 0 \quad \Rightarrow \quad y = -x$$

De esta ecuación obtenemos dos vectores linealmente independientes del plano y por tanto, una base ortogonal asociada al giro es:

$$\left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

- (d) Dar una matriz, respecto de la base usual de (\mathbb{R}^3) , de una de las métricas de g .

Sea la matriz de f en la base usual:

$$A = M(f, \mathcal{B}_u) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Queremos determinar una métrica simétrica definida positiva $G \in \mathcal{S}_3(\mathbb{R})$ tal que f sea una isometría respecto a g , es decir, que se cumpla:

$$A^t G A = G$$

Cálculo: Sea $G = \begin{pmatrix} a & b & c \\ b & d & e \\ c & e & h \end{pmatrix}$, y calculemos:

$$A^t = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Entonces:

$$A^t G = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b & c \\ b & d & e \\ c & e & h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c & e & h \\ a + b + c & b + d + e & c + e + h \\ -b & -d & -e \end{pmatrix}$$

Y finalmente:

$$A^tGA = \begin{pmatrix} c & e & h \\ a+b+c & b+d+e & c+e+h \\ -b & -d & -e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} h & -c-e-h & e \\ -c-e-h & a+2b+2c+d+2e+h & -b-d-e \\ e & -b-d-e & d \end{pmatrix}$$

Igualamos con G , y se obtiene un sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} h = a \\ -c - e - h = b \\ e = c \\ a + 2b + 2c + d + 2e + h = d \\ -b - d - e = e \end{cases}$$

Resolviendo el sistema, una solución posible es:

$$G = \begin{pmatrix} 2 & 0 & -1 \\ 0 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix}$$

Definida positiva por el criterio de Sylvester:

$$|2| > 0, \quad \begin{vmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{vmatrix} = 4 > 0, \quad \begin{vmatrix} 2 & 0 & -1 \\ 0 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{vmatrix} = 4 > 0 \Rightarrow G \text{ es definida positiva.}$$

Por tanto, f es una isometría respecto a la métrica g de matriz G .

Ejercicio 3 (4 puntos). Se considera la siguiente matriz con coeficientes reales:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a & 1 \\ 0 & 1 & a \end{pmatrix}$$

Sea g_a la métrica de \mathbb{R}^3 cuya matriz en la base usual es A . Sea f el endomorfismo de \mathbb{R}^3 cuya matriz en la base usual es también A .

(a) Calcular la signatura y clasificar la métrica g_a según los valores de a .

Calculamos el determinante de la métrica g_a :

$$\det(g_a) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a & 1 \\ 0 & 1 & a \end{vmatrix} = 1 \cdot \begin{vmatrix} a & 1 \\ 1 & a \end{vmatrix} = a^2 - 1$$

Por tanto, g_a es no degenerada si $a \neq \pm 1$. Estudiamos la signatura en función de los valores de a :

- **Caso $a > 1$ (por ejemplo $a = 2$):**

$$g = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

Menores principales:

$$\Delta_1 = 1 > 0, \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{vmatrix} = 2 > 0, \quad \Delta_3 = \det(g) = a^2 - 1 = 4 - 1 = 3 > 0$$

Por el criterio de Sylvester, la métrica es definida positiva. Signatura: $(3, 0)$

$$\begin{pmatrix} + & & \\ & + & \\ & & + \end{pmatrix}$$

- **Caso $-1 < a < 1$ (por ejemplo $a = 1/2$):**

$$g = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 1 \\ 0 & 1 & 1/2 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_1 = 1 > 0, \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/2 \end{vmatrix} = 1/2 > 0, \quad \Delta_3 = -3/4 < 0$$

Como el determinante es negativo, la signatura es $(2, 1)$: métrica indefinida.

$$\begin{pmatrix} + & & \\ & + & \\ & & - \end{pmatrix}$$

- **Caso $a < -1$ (por ejemplo $a = -2$):**

$$g = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 1 \\ 0 & 1 & -2 \end{pmatrix}$$

$$\det(g) = a^2 - 1 = 4 - 1 = 3 > 0$$

Pero el segundo menor:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -2 \end{vmatrix} = -2 < 0$$

Por tanto, la signatura es también $(2, 1)$: métrica indefinida.

$$\begin{pmatrix} + & & \\ & + & \\ & & - \end{pmatrix}$$

- **Caso $a = 1$:** La métrica es:

$$G_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Como el determinante es cero, la métrica es **degenerada**.

Buscamos ahora un vector $\vec{e}_1 \in \mathbb{R}^3$ tal que $g(\vec{e}_1, \vec{e}_1) \neq 0 \quad \forall \vec{x} \in \mathbb{R}^3$.
Por simplicidad, probamos con $\vec{e}_1 = (1, 0, 0)$.

Buscamos ahora su perpendicular tal que $g(\vec{e}_1, \vec{e}_2) = 0 \quad \forall \vec{x} \in \mathbb{R}^3$ y
que $g(\vec{e}_2, \vec{e}_2) \neq 0$.

$$g_1(\vec{e}_1, \vec{e}_2) = (1 \ 0 \ 0) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = (1 \ 0 \ 0) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = x_1 = 0$$

Entonces, cualquier vector ortogonal a $\vec{e}_1 = (1, 0, 0)$ en la métrica g_1 debe cumplir $x_1 = 0$, por lo que:

$$\vec{e}_2 \in \left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

Elijamos $\vec{e}_2 = (0 \ 1 \ 0)$ y que $g_1(\vec{e}_2, \vec{e}_2) = 1$
Por lo que obtenemos la matriz de Sylvester:

$$S_1 = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 0 \end{pmatrix}$$

- **Caso $a = -1$:**

$$G_{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

La métrica también es **degenerada**.

Probamos $\vec{e}_1 = (1, 0, 0)$, tal que

$$g_{-1}(\vec{e}_1, \vec{e}_1) \neq 0$$

Buscamos ahora su perpendicular tal que $g_{-1}(\vec{e}_1, \vec{e}_2) = 0 \quad \forall \vec{x} \in \mathbb{R}^3$ y
que $g_{-1}(\vec{e}_2, \vec{e}_2) \neq 0$.

$$g_{-1}(\vec{e}_1, \vec{e}_2) = (1 \ 0 \ 0) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = (1 \ 0 \ 0) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = x_1 = 0$$

Entonces obtenemos:

$$\left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$

Elijamos $\vec{e}_2 = (0 \ 1 \ 0)$ y que $g_{-1}(\vec{e}_2, \vec{e}_2) = -1$ Por lo que obtenemos la matriz de Sylvester:

$$S_1 = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & -1 & \\ & & 0 \end{pmatrix}$$

- (b) Para $a = 1$ obtener una base conjugada (es decir, ortogonal) para la métrica g_1 .

Ya en el apartado anterior obtuvimos una base ortogonal para el plano no degenerado de g_1 , formada por los vectores:

$$\vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Como la métrica es degenerada, el tercer vector ortogonal debe tomarse en el núcleo de g_1 . Calculamos el núcleo resolviendo $G\vec{x} = 0$, con:

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} x_1 = 0 \\ x_2 + x_3 = 0 \end{cases} \Rightarrow \ker(g_1) = \mathcal{L} \left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right\}$$

Por tanto, una base conjugada ortogonal para g_1 es:

$$\left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right\}$$

- (c) ¿Para qué valores de a es g_a una métrica euclídea y f autoadjunto en (\mathbb{R}^3, g_a) ?

En el apartado (a) calculamos que la métrica g_a es definida positiva (y por tanto, euclídea) si y solo si $a > 1$. Así que, en lo que respecta a la euclideanidad, esto solo ocurre para valores de $a > 1$.

Ahora, veamos cuándo f es autoadjunto respecto de g_a . Para ello, recordamos que se cumple:

$$M(f, \mathcal{B})^t \cdot G = G \cdot M(f, \mathcal{B})$$

Donde la matriz resultante debe ser **simétrica** y que la matriz G de la métrica g_a en la base usual es:

$$G = A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a & 1 \\ 0 & 1 & a \end{pmatrix} = M(f, \mathcal{B})$$

Entonces:

$$A^t G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a & 1 \\ 0 & 1 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a & 1 \\ 0 & 1 & a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a^2 + 1 & 2a \\ 0 & 2a & a^2 + 1 \end{pmatrix}$$

y por otro lado:

$$GA = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a & 1 \\ 0 & 1 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a & 1 \\ 0 & 1 & a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a^2 + 1 & 2a \\ 0 & 2a & a^2 + 1 \end{pmatrix}$$

Por tanto, se cumple que $A^t G = GA$ y que es simétrica para todo valor de a , lo que implica que f es autoadjunto respecto de g_a para cualquier $a \in \mathbb{R}$.

Conclusión: f es autoadjunto para todo $a \in \mathbb{R}$, pero g_a es euclídea solo si $a > 1$.

- (d) Para $a = 2$ calcular, si es posible, una base ortogonal de (\mathbb{R}^3, g_2) formada por vectores propios de f .

Calculamos el polinomio característico de f y sus subespacios propios.

$$p_f(\lambda) = \begin{vmatrix} 1 - \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 2 - \lambda & 1 \\ 0 & 1 & 2 - \lambda \end{vmatrix} = (1 - \lambda) \begin{vmatrix} 2 - \lambda & 1 \\ 1 & 2 - \lambda \end{vmatrix} =$$

$$(1 - \lambda) ((2 - \lambda)^2 - 1) = (1 - \lambda) (\lambda^2 - 4\lambda + 3) = -(\lambda - 1)^2 (\lambda - 3)$$

Para $\lambda = 1$, resolvemos $(A - I)\vec{x} = 0$:

$$(A - I) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow x_2 + x_3 = 0 \Rightarrow V_1 = \mathcal{L} \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right)$$

Para $\lambda = 3$, resolvemos $(A - 3I)\vec{x} = 0$:

$$(A - 3I) = \begin{pmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} x = 0 \\ -y + z = 0 \end{cases} \Rightarrow V_3 = \mathcal{L} \left(\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right)$$

Estos vectores forman una base ortogonal ya que $V_1 \perp V_3$, y los dos vectores que generan V_1 son perpendiculares entre sí:

$$g_2 \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right) = 0$$

Por tanto, la base pedida es:

$$\mathcal{B} = \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$$