



Sandra Natalia Florez Garcia

Edgar Santiago Ochoa Quiroga

María Alejandra Rodríguez Ríos

Ejercicio 1 Sea $(E, \|\cdot\|)$ un espacio vectorial normado. Defina

$$K = \{x \in E : \|x\| = 1\}.$$

Demuestre que E es de Banach si y solamente si K es completo.

Ejercicio 2 Sean $(E, \|\cdot\|_E)$ y $(F, \|\cdot\|_F)$ espacios vectoriales normados. Considere $T : E \rightarrow F$ una transformación lineal. Muestre que las siguientes afirmaciones son equivalentes:

- (i) T es continua.
- (ii) T es continua en cero.
- (iii) T es acotada. Es decir, existe $M > 0$ tal que para todo $x \in E$,

$$\|Tx\|_F \leq M\|x\|_E.$$

- (iv) Si $\overline{B(0, 1)} = \{x \in E : \|x\|_E \leq 1\}$, entonces la imagen directa $T(B(0, 1))$ es un conjunto acotado de F .

Demostración. Para establecer la equivalencia entre estas afirmaciones, probaremos la cadena de implicaciones $(i) \rightarrow (ii) \rightarrow (iii) \rightarrow (iv) \rightarrow (i)$.

- $(i) \rightarrow (ii)$: Si T es continua en todo punto de E , en particular es continua en el origen.
- $(ii) \rightarrow (iii)$: Supongamos que T es continua en el origen. Entonces, por definición de continuidad, dado $\varepsilon = \frac{1}{9}$, existe $\delta > 0$ tal que si $\|x\|_E < \delta$, entonces $\|Tx\|_F < \frac{1}{9}$.

Sea $x \in E$ con $x \neq 0$, y definamos $y = \frac{\delta x}{3\|x\|_E}$. Entonces, $\|y\|_E = \frac{\delta}{3} < \delta$, por lo que se cumple que $\|Ty\|_F < \frac{1}{9}$.

Utilizando la linealidad de T , tenemos

$$\begin{aligned} \left\| T \left(\frac{\delta x}{3\|x\|_E} \right) \right\|_F &< \frac{1}{9}, \\ \frac{\delta}{3\|x\|_E} \|Tx\|_F &< \frac{1}{9}, \\ \|Tx\|_F &< \frac{3}{\delta} \|x\|_E. \end{aligned}$$

Por lo tanto, si tomamos $M = \frac{3}{\delta}$, se tiene que para todo $x \in E$,

$$\|Tx\|_F \leq M\|x\|_E,$$

lo cual demuestra que T es acotada.

- (iii) \Rightarrow (iv): Supongamos que T es acotada. Entonces existe $M > 0$ tal que para todo $x \in E$, se cumple que $\|Tx\|_F \leq M\|x\|_E$. En particular, si $x \in \overline{B(0, 1)}$, es decir, $\|x\|_E \leq 1$, entonces

$$\|Tx\|_F \leq M$$

como lo anterior se tiene para todo punto en $\overline{B(0, 1)}$, se tiene que $T(\overline{B(0, 1)})$ está contenido en la bola cerrada de radio M en F , lo que implica que $T(\overline{B(0, 1)})$ es un conjunto acotado.

- (iv) \Rightarrow (i): Supongamos que $T(\overline{B(0, 1)})$ es acotado. Entonces existe una constante $M > 0$ tal que para todo $x \in \overline{B(0, 1)}$, se cumple que

$$\|Tx\|_F \leq M.$$

Sea $x \in E$ con $x \neq 0$. Tomemos $y = \|x\|_E \cdot \frac{x}{\|x\|_E}$, donde $\frac{x}{\|x\|_E} \in \overline{B(0, 1)}$. Usando la linealidad de la transformación T y la desigualdad anterior, obtenemos,

$$\|Tx\|_F = \left\| T \left(\|x\|_E \cdot \frac{x}{\|x\|_E} \right) \right\|_F = \|x\|_E \cdot \left\| T \left(\frac{x}{\|x\|_E} \right) \right\|_F \leq \|x\|_E \cdot M.$$

Por lo tanto, T es acotada. Luego, para todo $\varepsilon > 0$ con $x', y' \in E$ tenemos que

$$\|Tx' - Ty'\| = \|T(x' - y')\| = M\|x' - y'\| < \varepsilon.$$

si se toma a $\delta = \frac{M}{\varepsilon}$.

Con lo cual se concluye la demostración.

□

Ejercicio 3

Demuestre que si $T \in \mathcal{L}(E, F)$, entonces:

- (i) $\|Tx\|_F \leq \|T\| \|x\|_E$, para todo $x \in E$.
- (ii) $\|T\| = \sup_{\substack{x \in E \\ x \neq 0}} \frac{\|Tx\|_F}{\|x\|_E}$.
- (iii) $\|T\| = \sup_{\|x\|_E=1} \|Tx\|_F$.
- (iv) $\|T\| = \inf \{M > 0 : \|Tx\|_F \leq M\|x\|_E, \forall x \in E\}$.

Demostración.

(i) Sea $\mathcal{L}(E, F)$ un espacio vectorial con la norma

$$\|T\| = \sup_{\substack{x \in E \\ \|x\| \leq 1}} \frac{\|Tx\|_F}{\|x\|_E}.$$

Por definición de supremo, se tiene que $\|Tx\| \leq \|T\|$ para todo $x \in E$ con $\|x\| \leq 1$.

Si $x = 0$, la desigualdad se cumple trivialmente. Tomemos ahora $x \in E$ con $x \neq 0$, y definamos

$$y = \frac{x}{\|x\|}.$$

Entonces, usando la linealidad de T , se tiene:

$$\|Ty\| = \left\| T \left(\frac{x}{\|x\|} \right) \right\| = \frac{1}{\|x\|} \|Tx\|.$$

Por la definición del supremo, como $\|y\| = 1$, se cumple que $\|Ty\| \leq \|T\|$, y por lo tanto:

$$\frac{1}{\|x\|} \|Tx\| \leq \|T\|.$$

Multiplicando ambos lados por $\|x\|$, obtenemos:

$$\|Tx\| \leq \|T\| \|x\|.$$

Así, se concluye que para todo $x \in E$, se cumple $\|Tx\| \leq \|T\| \|x\|$, como queríamos.

(ii-iv) Definamos:

$$\alpha = \sup_{\|x\|_E=1} \|Tx\|_F,$$

$$\beta = \sup_{\substack{x \in E \\ x \neq 0}} \frac{\|Tx\|_F}{\|x\|_E},$$

$$\gamma = \inf \{M > 0 : \|Tx\|_F \leq M \|x\|_E, \forall x \in E\}.$$

Veamos que $\|Tx\| \leq \alpha$ para todo $x \in E$ con $\|x\| = 1$. Tomemos $y \in E$ con $y \neq 0$ tal que $x = \frac{y}{\|y\|}$, entonces:

$$\|Tx\| = \left\| T \left(\frac{y}{\|y\|} \right) \right\| = \frac{\|Ty\|}{\|y\|} \leq \alpha.$$

Como esto vale para todo $y \in E$ con $y \neq 0$, se concluye que $\beta \leq \alpha$.

Por otro lado, para todo $x \in E$ con $x \neq 0$, se cumple:

$$\frac{\|Tx\|}{\|x\|} \leq \beta.$$

Entonces, usando la linealidad de T ,

$$\left\| T \left(\frac{x}{\|x\|} \right) \right\| \leq \beta.$$

Si definimos $y = \frac{x}{\|x\|}$, entonces $\|y\| = 1$, y se obtiene que $\|Ty\| \leq \beta$ para todo $y \in E$ con $\|y\| = 1$. Por lo tanto, $\alpha \leq \beta$.

En consecuencia, $\alpha = \beta$.

Ahora, si $M > 0$ es cualquier número en el conjunto que define a γ , entonces se cumple que $\|Tx\| \leq M\|x\|$ para todo $x \in E$. Esto implica que

$$\frac{\|Tx\|}{\|x\|} \leq M,$$

y por lo tanto, $\beta \leq M$ para todo M en dicho conjunto. En consecuencia, $\beta \leq \gamma$.

Por otro lado, ya sabemos que $\frac{\|Tx\|}{\|x\|} \leq \beta$ para todo $x \in E$, $x \neq 0$, lo cual equivale a $\|Tx\| \leq \beta\|x\|$. Es decir, β también cumple la propiedad que define γ , así que $\gamma \leq \beta$. Concluimos entonces que:

$$\alpha = \beta = \gamma.$$

Finalmente, notemos que $\|T\| \geq \alpha$, ya que:

$$\{x \in E : \|x\| = 1\} \subseteq \{x \in E : \|x\| \leq 1\}.$$

Por otro lado, si M pertenece al conjunto que define a γ , entonces para todo $x \in E$ con $\|x\| \leq 1$, se tiene $\|Tx\| \leq M$, y como M es una cota superior de $\|Tx\|$ sobre la bola unitaria, se concluye que $\|T\| \leq M$. Por ser esto válido para todo M del conjunto que define a γ , se tiene que $\|T\| \leq \gamma$.

Por lo tanto,

$$\|T\| = \alpha = \beta = \gamma.$$

□

Ejercicio 4 .

Sean $(E, \|\cdot\|_E)$ y $(F, \|\cdot\|_F)$ espacios vectoriales normados. Suponga que F es un espacio de Banach. Muestre que $\mathcal{L}(E, F)$ es un espacio de Banach con la norma usual de $\mathcal{L}(E, F)$. En particular, concluya que $E^* = \mathcal{L}(E, \mathbb{R})$ y $E^{**} = \mathcal{L}(E^*, \mathbb{R})$ son espacios de Banach.

Demostración.

Sea $(E, \|\cdot\|_E)$ un espacio normado y sea $(F, \|\cdot\|_F)$ un espacio de Banach. Consideremos el conjunto $\mathcal{L}(E, F)$ de todas las aplicaciones lineales y continuas de E en F , provisto de la norma definida por

$$\|T\| := \sup_{\|x\|_E \leq 1} \|T(x)\|_F.$$

Queremos demostrar que $\mathcal{L}(E, F)$, con esta norma, es un espacio de Banach.

Sea $(T_n)_{n \in \mathbb{N}} \subseteq \mathcal{L}(E, F)$ una sucesión de Cauchy. Por definición, para todo $\varepsilon > 0$, existe $N \in \mathbb{N}$

tal que para todo $n, m \geq N$,

$$\|T_n - T_m\| < \varepsilon.$$

Es decir, para todo $x \in E$ con $\|x\|_E \leq 1$, se tiene

$$\|T_n(x) - T_m(x)\|_F < \varepsilon.$$

Ahora, sea $x \in E$ arbitrario (no necesariamente de norma menor o igual que uno). Para todo $n, m \geq N$, se cumple

$$\|T_n(x) - T_m(x)\|_F = \|(T_n - T_m)(x)\|_F \leq \|T_n - T_m\| \cdot \|x\|_E.$$

Dado $\varepsilon > 0$, si $x \neq 0$, se puede tomar $\delta := \varepsilon/\|x\|_E$, y por ser (T_n) de Cauchy, existe $N \in \mathbb{N}$ tal que para todo $n, m \geq N$,

$$\|T_n - T_m\| < \delta = \frac{\varepsilon}{\|x\|_E},$$

lo que implica

$$\|T_n(x) - T_m(x)\|_F < \varepsilon.$$

En el caso $x = 0$, se tiene trivialmente que $T_n(0) = 0$ para todo n , por lo que la sucesión es constante y, en particular, de Cauchy. Así, se concluye que para todo $x \in E$, la sucesión $(T_n(x))_{n \in \mathbb{N}} \subseteq F$ es de Cauchy.

Como F es un espacio de Banach, existe un elemento $T(x) \in F$ tal que

$$T_n(x) \rightarrow T(x) \in F.$$

Esto define una aplicación $T : E \rightarrow F$ mediante

$$T(x) := \lim_{n \rightarrow \infty} T_n(x).$$

Veamos que T es lineal. Sean $x, y \in E$ y $\lambda \in \mathbb{K}$ (donde $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ o \mathbb{C}). Como cada T_n es lineal, se tiene

$$T_n(\lambda x + y) = \lambda T_n(x) + T_n(y),$$

y como los límites existen en F , se concluye que

$$T(\lambda x + y) = \lim_{n \rightarrow \infty} T_n(\lambda x + y) = \lim_{n \rightarrow \infty} (\lambda T_n(x) + T_n(y)) = \lambda T(x) + T(y),$$

es decir, T es lineal.

Mostremos ahora que T es acotada. Como (T_n) es Cauchy en $\mathcal{L}(E, F)$, existe una constante $M > 0$ tal que $\|T_n\| \leq M$ para todo $n \in \mathbb{N}$. Entonces, para todo $x \in E$,

$$\|T_n(x)\|_F \leq \|T_n\| \cdot \|x\|_E \leq M\|x\|_E,$$

y pasando al límite cuando $n \rightarrow \infty$,

$$\|T(x)\|_F \leq M\|x\|_E.$$

Esto demuestra que $T \in \mathcal{L}(E, F)$, es decir, T es lineal y continua.

Finalmente, veamos que $T_n \rightarrow T$ en $\mathcal{L}(E, F)$. Dado $\varepsilon > 0$, existe $N \in \mathbb{N}$ tal que para todo $n, m \geq N$,

$$\|T_n - T_m\| < \varepsilon.$$

Fijado $n \geq N$, y tomando el límite cuando $m \rightarrow \infty$, se obtiene

$$\|T_n - T\| = \sup_{\|x\|_E \leq 1} \|T_n(x) - T(x)\|_F \leq \varepsilon.$$

Por tanto, $\|T_n - T\| \rightarrow 0$, lo que implica que $T_n \rightarrow T$ en $\mathcal{L}(E, F)$.

Concluimos que $\mathcal{L}(E, F)$, con la norma $\|\cdot\|$, es un espacio de Banach. \square

Ejercicio 5 Sean E y F espacios vectoriales normados. Suponga que E es de dimensión finita (no se asume que F sea de dimensión finita).

(i) Muestre que todas las normas asignadas a E son equivalentes.

Demostración. Sea E un espacio vectorial normado de dimensión finita N . Para esta demostración basta probar que E es isomorfo al espacio ℓ_1^N . Por consiguiente, dadas dos normas en E , estas serán isomorfas a ℓ_1^N para cada una de estas normas, y de esto deduciremos la equivalencia de las normas.

Sea $\mathcal{B} = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ la base canónica de ℓ_1^N . Tomemos una base $\mathcal{B}' = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ para E . Definamos una aplicación $T : \ell_1^N \rightarrow E$ tal que $T(e_i) = v_i$ para todo $1 \leq i \leq N$. Por su definición, tenemos que T es transformación lineal.

Veamos ahora que T es continua, para ello veremos que es acotada.

Sea $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$, luego $x = \sum_{i=1}^N x_i e_i$. Por lo cual,

$$T(x) = \sum_{i=1}^N x_i T(e_i) = \sum_{i=1}^N x_i v_i.$$

Así,

$$\begin{aligned} \|T(x)\|_E &= \left\| \sum_{i=1}^N x_i v_i \right\|_E \\ &\leq \sum_{i=1}^N \|x_i v_i\|_E \\ &= \sum_{i=1}^N |x_i| \cdot \|v_i\|_E \\ &\leq \sum_{i=1}^N |x_i| \cdot \max_{1 \leq i \leq N} \|v_i\|_E \end{aligned}$$

si $K = \max_{1 \leq i \leq N} \|v_i\|_E$, entonces T está acotada y por ende es continua. Adicionalmente, T es biyectiva por su definición.

Ahora, razonando por reducción al absurdo suponga que T^{-1} no es una transformación lineal continua, lo cual por las equivalencias mostradas en el ejercicio 2 la no continuidad debe fallar en 0. Esto nos indica que podemos encontrar una sucesión $\{y_n\}$ en V y un número real $\varepsilon > 0$ tal que $\|T^{-1}(y_n)\|_1 > \varepsilon$ mientras que $y_n \rightarrow 0$. Definamos

$$z_n = \frac{y_n}{\|T^{-1}(y_n)\|_1},$$

entonces cuando $z_n \rightarrow 0$

$$\begin{aligned} \|T^{-1}(z_n)\|_1 &= \left\| T^{-1} \left(\frac{y_n}{\|T^{-1}(y_n)\|_1} \right) \right\|_1 \\ &= \frac{1}{\|T^{-1}(y_n)\|_1} \cdot \|T^{-1}(y_n)\|_1 \\ &= 1. \end{aligned}$$

Ahora bien, mostremos que el siguiente conjunto es compacto, sea

$$B = \{x \in \ell_1^N : \|x\|_1 \leq 1\},$$

note que B es cerrado y acotado, y al ser la topología en ℓ_1^N es la misma que con la topología usual en \mathbb{R}^N . tenemos que B es también secuencialmente compacto, y entonces, por definición, existe una subsucesión $\{z_{n_k}\}$ tal que $\{T^{-1}(z_{n_k})\}$ es convergente.

Sea $T^{-1}(z_{n_k}) \rightarrow x$, teniendo en cuenta que $\|T^{-1}(z_{n_k})\|_1 = 1$ y $T^{-1}(z_{n_k}) \rightarrow x$, entonces $\|x\|_1 = 1$.

Dado que T es continua,

$$\lim T(T^{-1}(z_{n_k})) = T(x),$$

es decir,

$$z_{n_k} \rightarrow T(x),$$

lo cual implica que $T(x) = 0$. Pero T es una aplicación 1-1 y $\|x\|_1 = 1$, por consiguiente $x \neq 0$, lo cual prueba que $T(x) \neq 0$. Esto nos lleva a una contradicción. Por ende, T^{-1} debe ser continua.

Por lo cual, para cualquier norma en E , la aplicación T es siempre un isomorfismo entre ℓ_1^N y E , lo cual implica que la aplicación de $(E, \|\cdot\|_{E_1})$ y $(E, \|\cdot\|_{E_2})$ también lo será, concluyendo así que las dos normas son equivalentes.

□

(ii) Muestre que toda transformación lineal $T : E \rightarrow F$ es continua.

Demostración. Sea $T : E \rightarrow F$ una transformación lineal, veamos que T es continua, para esto de acuerdo con el ejercicio 2 de este taller, sabemos que basta con mostrar que es acotada.

Como E es un espacio vectorial de dimensión finita, tomemos la base de E como $\mathcal{B} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, luego si $x \in E$ tenemos que $x = \sum_{i=1}^n x_i v_i$, entonces la transformación lineal T es de la forma,

$$\begin{aligned} T x &= T \left(\sum_{i=1}^n x_i v_i \right) \\ &= \sum_{i=1}^n x_i T(v_i), \\ &= \sum_{i=1}^n x_i v_i \max_{1 \leq i \leq n} \|T(v_i)\|_E, \end{aligned}$$

luego, tenemos que

$$\begin{aligned} \|T\|_E &= \left\| \sum_{i=1}^n x_i T(v_i) \right\|_E \\ &\leq \sum_{i=1}^n \|x_i T(v_i)\|_E \\ &= \sum_{i=1}^n |x_i| \cdot \|T(v_i)\|_E, \end{aligned}$$

por el punto anterior, como E es un espacio de dimensión finita existen constantes positivas C_1 y C_2 , tal que $C_1 \|x\|_E \leq \|x\|_1 \leq C_2 \|x\|_E$ y si tomamos a $M_1 = \max_{1 \leq i \leq n} \|T(v_i)\|_E$, entonces,

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n |x_i| \cdot \|T(v_i)\|_E &= \|x\|_1 \max_{1 \leq i \leq n} \|T(v_i)\|_E, \\ &\leq M_1 C_2 \|x\|_E \\ &= M \|x\|_E, \end{aligned}$$

por lo cual, T es acotado y continuo. □

(iii) Dé un ejemplo donde se verifique que (ii) puede ser falsa si E es de dimensión infinita.

Solución. Sea $T : (C^1([0, 1]), \|\cdot\|_\infty) \longrightarrow (\mathbb{R}, |\cdot|)$ donde por $f \mapsto f'(0)$. Note que T es una transformación lineal.

Como queremos mostrar que la transformación no es continua, demostremos que T no es acotada.

Demostración. Supongamos que $T \in \mathcal{L}(E, \mathbb{R})$ con $\|\cdot\|_{\mathcal{L}^\infty}$, por lo cual, existe $M > 0$ tal que

$$|T(x)| = |f'(0)| \leq M\|f\|_{\mathcal{L}^\infty} \quad \text{para todo } f \in C^1([0, 1]).$$

Sea $n \geq 2$ y $f(x) = (1 - x)^n$, entonces,

$$\|f\|_{\mathcal{L}^\infty} = 1, \quad f'(x) = -n(1 - x)^{n-1}, \quad f'(0) = -n.$$

Reemplazando

$$n = |f'(0)| \leq M\|f\|_\infty = M.$$

Por tanto, cuando $n \rightarrow \infty$, se tendría $n \leq M$ para todo $n \geq 2$, lo cual es una contradicción. Entonces T no es acotada.

□

Ejercicio 6

Considere $E = c_0$, donde

$$c_0 = \left\{ u = \{u_n\}_{n \geq 1} : \text{tales que } u_n \in \mathbb{R}, \lim_{n \rightarrow \infty} u_n = 0 \right\}.$$

Es decir, c_0 es el conjunto de las secuencias reales que tienden a cero. Dotamos a este espacio con la norma $\|u\|_{\ell^\infty} = \sup_{n \in \mathbb{Z}^+} |u_n|$. Considere el funcional $f : E \rightarrow \mathbb{R}$ dado por

$$f(u) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} u_n.$$

- (i) Muestre que $f \in E^*$ y calcule $\|f\|_{E^*}$.
- (ii) ¿Es posible encontrar $u \in E$ tal que $\|u\| = 1$ y $f(u) = \|f\|_{E^*}$?