

ÁLGEBRA III

Práctica 1– Primer Cuatrimestre de 2003

Anillos, cuerpos y morfismos

Ejercicio 1. Sea A un anillo. Probar que:

- i) A tiene ideales maximales.
- ii) Para todo \mathcal{I} ideal propio de A existe un ideal maximal de A que contiene a \mathcal{I} .
- iii) $\bigcup_{\mathcal{M} \text{ maximal}} \mathcal{M} = \{x \in A / x \text{ no es unidad}\}$
- iv) Si \mathcal{M} es un ideal maximal de A entonces es un ideal primo. Mostrar que no vale la vuelta.
- v) \mathcal{P} es un ideal primo de A si y sólo si A/\mathcal{P} es un dominio íntegro.
- vi) A es un cuerpo si y sólo si tiene exactamente dos ideales.
- vii) \mathcal{M} es un ideal maximal de A si y sólo si A/\mathcal{M} es un cuerpo.

Ejercicio 2. Sea $f : A \rightarrow B$ un morfismo de anillos. Probar que:

- i) $\text{Ker}(f)$ es un ideal propio de A .
- ii) $\text{Im}(f)$ es un subanillo de B .
- iii) Si \mathcal{I} es un ideal de B entonces $f^{-1}(\mathcal{I})$ es un ideal de A que contiene a $\text{Ker}(f)$.
- iv) Si \mathcal{I} es un ideal de A y f es un *epimorfismo* entonces $f(\mathcal{I})$ es un ideal de B .
- v) Si \mathcal{I} es un ideal primo de B entonces $f^{-1}(\mathcal{I})$ es un ideal primo de A .
- vi) Si f es un epimorfismo y \mathcal{M} es un ideal maximal de B entonces $f^{-1}(\mathcal{M})$ es un ideal maximal de A .

Ejercicio 3. Probar que:

- i) Si \mathbb{K} es un cuerpo y $f : \mathbb{K} \rightarrow B$ es un morfismo de anillos, entonces f es inyectivo.
- ii) Si A es un anillo tal que todo morfismo de anillos que tiene como conjunto de partida a A es inyectivo, entonces A es un cuerpo.

Ejercicio 4.

- i) Sea D un dominio íntegro finito. Probar que D es un cuerpo.
- ii) Probar que \mathbb{C} no tiene subcuerpos finitos.

Ejercicio 5. Dado $b \in \mathbb{C}$ se define $\mathbb{Q}[b] = \left\{ \sum_{i=0}^n a_i b^i / a_i \in \mathbb{Q} \right\}$. Probar que $\mathbb{Q}[\sqrt{2}]$, $\mathbb{Q}[\sqrt{3}]$, $\mathbb{Q}[i]$ y $\mathbb{Q}[\sqrt[3]{2}]$ son cuerpos.

Ejercicio 6. Caracterizar los siguientes conjuntos:

- i) $\{f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}, f \text{ isomorfismo de cuerpos}\}$.
- ii) $\{f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}, f \text{ morfismo de cuerpos}\}$.
- iii) $\{f : \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{Z}_p, f \text{ morfismo de cuerpos}, p \text{ primo}\}$.
- iv) $\{f : \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{K}, f \text{ morfismo de cuerpos}, \mathbb{K} \text{ cuerpo fijo}\}$.
- v) $\{f : \mathbb{Q}[\sqrt{2}] \rightarrow \mathbb{Q}[\sqrt{3}], f \text{ morfismo de cuerpos}\}$.
- vi) $\{f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}, f \text{ morfismo de cuerpos tal que } f(a) = a \forall a \in \mathbb{R}\}$.
- vii) $\{f : \mathbb{Q}[i] \rightarrow \mathbb{Q}[i], f \text{ morfismo de cuerpos}\}$.
- viii) $\{f : \mathbb{Q}[i] \rightarrow \mathbb{Q}[i], f \text{ isomorfismo de cuerpos}\}$.
- ix) $\{f : \mathbb{Q}[i] \rightarrow \mathbb{R}, f \text{ morfismo de cuerpos}\}$.
- x) $\{f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, f \text{ morfismo de cuerpos}\}$.

Ejercicio 7. Sea \mathbb{K} un cuerpo y sea A una \mathbb{K} -álgebra de dimensión finita. Probar que si A es un dominio íntegro, entonces es un cuerpo.

Ejercicio 8. Sea A un anillo. Notamos $\mathcal{U}(A)$ al conjunto de los elementos de A que tienen inverso multiplicativo.

- i) Probar que $(\mathcal{U}(A), \cdot)$ es un grupo, llamado el *grupo de unidades* de A .
- ii) Caracterizar el grupo de unidades de los siguientes anillos:
 \mathbb{Z}, \mathbb{K} (\mathbb{K} cuerpo), $\mathbb{Z}[i], \mathbb{Z}[\sqrt{-5}], A[X]$ (A dominio íntegro), \mathbb{Z}_n .

Ejercicio 9. Sea A un dominio íntegro. Consideremos en el conjunto $A \times A - \{0\}$ la relación de equivalencia

$$(a, b) \sim (c, d) \iff ad = bc$$

Definimos en $K = A \times A - \{0\} / \sim$ las siguientes operaciones:

$$\begin{aligned} (a, b) + (c, d) &= (ad + cb, bd) \\ (a, b) \cdot (c, d) &= (ac, bd) \end{aligned}$$

- i) Probar que $(K, +, \cdot)$ es un cuerpo, llamado el *cuerpo de fracciones* (o de cocientes) del anillo A .
- ii) Probar que $f : A \rightarrow K$ definida por $f(a) = (a, 1)$ es un monomorfismo de anillos.
- iii) Sea D un anillo. Probar que son equivalentes:
 - (a) D es un dominio íntegro.
 - (b) Existe $f : D \rightarrow K$ monomorfismo de anillos para algún cuerpo K .

Ejercicio 10. Caracterizar el cuerpo de fracciones de los siguientes dominios íntegros:

$$\mathbb{Z}; \mathbb{Z}[i]; \mathbb{Z}[\sqrt{2}]; A[X] \text{ (} A \text{ dominio íntegro); } \mathbb{K} \text{ (} \mathbb{K} \text{ cuerpo).}$$

Ejercicio 11. Sea \mathbb{K} un cuerpo. Se definen en $\mathbb{K} \times \mathbb{K}$ las siguientes operaciones:

$$\begin{aligned}(a, b) + (c, d) &= (a + c, b + d) \\ (a, b) \cdot (c, d) &= (ac - bd, ad + bc)\end{aligned}$$

- i) Probar que $(\mathbb{K} \times \mathbb{K}, +, \cdot)$ es un anillo.
- ii) Probar que cuando \mathbb{K} es \mathbb{C} , \mathbb{Z}_2 o \mathbb{Z}_5 entonces $(\mathbb{K} \times \mathbb{K}, +, \cdot)$ no es cuerpo, mientras que si \mathbb{K} es \mathbb{R} , \mathbb{Z}_3 o \mathbb{Z}_7 sí lo es.
- iii) Probar que $(a, b) \in \mathbb{K} \times \mathbb{K}$ es inversible si y sólo si $a^2 + b^2 \neq 0$.
- iv) Deducir que $\mathbb{K} \times \mathbb{K}$ es cuerpo si y sólo si $a^2 + b^2 = 0$ en $\mathbb{K} \Leftrightarrow a = b = 0$.
- v) Probar que si p es primo, $\mathbb{Z}_p \times \mathbb{Z}_p$ es cuerpo si y sólo si p es de la forma $4k + 3$, con $k \in \mathbb{Z}$.

Dominios de factorización única, álgebras de polinomios e irreducibilidad de polinomios

Ejercicio 12. Probar que si A es un dominio íntegro entonces $A[(X_i)_{i \in I}]$ es un dominio íntegro.

Ejercicio 13. Sea A un dominio íntegro y sea $a \in A$. Probar que:

- i) Si a es primo, entonces a es irreducible.
- ii) Si A es DFU (dominio de factorización única), a irreducible implica a primo.
- iii) En $A = \mathbb{Z}[\sqrt{-5}]$ los elementos 3 , 7 , $4 + \sqrt{-5}$, $4 - \sqrt{-5}$, $1 + 2\sqrt{-5}$ y $1 - 2\sqrt{-5}$ son irreducibles pero no primos. ¿Conclusiones?
- iv) Si A es DFU entonces $A[(X_i)_{i \in I}]$ es DFU.
- v) Si A es principal entonces A es DFU, pero no vale la recíproca.
- vi) Si $f : A \rightarrow B$ es un isomorfismo de anillos, a es irreducible en A si y sólo si $f(a)$ es irreducible en B .

Ejercicio 14. Sean $A \subseteq B \subseteq C$ dominios íntegros. Dar un ejemplo en que A y C sean DFU y B no.

Ejercicio 15. Un dominio íntegro A se dice *euclideo* si está provisto de un algoritmo de división, es decir, si existe $g : A - \{0\} \rightarrow \mathbb{N} \cup \{0\}$ que satisface las dos condiciones siguientes:

- $\forall a, b \in A - \{0\}$, si $a|b$ entonces $g(a) \leq g(b)$
- $\forall a, b \in A - \{0\}$ existen $q, r \in A$ tales que $a = b \cdot q + r$ y $r = 0$ o $g(r) < g(b)$

Probar que:

- i) \mathbb{Z} , $\mathbb{Z}[i]$, \mathbb{K} y $\mathbb{K}[X]$ (\mathbb{K} cuerpo) son anillos euclidianos.
- ii) Si A es un anillo euclidiano, entonces A es principal.

Ejercicio 16. Sea $p \in \mathbb{Z}$ primo. Probar que:

- i) p es irreducible en $\mathbb{Z}[i]$ si y sólo si p no es suma de dos cuadrados (en \mathbb{Z}).
- ii) p es suma de dos cuadrados (en \mathbb{Z}) si y sólo si $p = 2$ o p es de la forma $4k + 1$.
- iii) p es primo en $\mathbb{Z}[i]$ si y sólo si p es de la forma $4k + 3$.

Ejercicio 17. Sea A un dominio íntegro y sea $P \in A[X]$. Definimos $e_P : A[X] \rightarrow A[X]$ en la forma $e_P(Q) = Q(P(X))$. Probar que:

- i) e_P es un morfismo de anillos, llamado *especialización en P* .
- ii) Todo morfismo de anillos de $A[X]$ en $A[X]$ que vale la identidad sobre A es una especialización en algún P .
- iii) Si una especialización e_P es un automorfismo de $A[X]$ entonces su inversa también es una especialización.
- iv) e_{cX+b} es un automorfismo de anillos si y sólo si $c \in \mathcal{U}(A)$.
- v) Si f es un automorfismo de $A[X]$ tal que $f(a) = a \forall a \in A$, entonces f es de la forma e_{cX+b} para algún $c \in \mathcal{U}(A)$.

Ejercicio 18.

- i) Sea \mathbb{K} un cuerpo y sea $f \in \mathbb{K}[X]$. Probar que $\mathbb{K}[X]/\langle f \rangle$ es un cuerpo si y sólo si f es irreducible.
- ii) Construir un cuerpo de 9 elementos.
- iii) Probar que $\mathbb{R}[X]/\langle X^2 + 1 \rangle \simeq \mathbb{C}$.

Ejercicio 19. Sea A un DFU y sea \mathbb{K} su cuerpo de cocientes. Probar que si $f \in A[X]$ es un polinomio irreducible de grado > 0 entonces, visto como polinomio con coeficientes en \mathbb{K} , también es irreducible. ¿Vale la recíproca?

Ejercicio 20. Sea $p \in \mathbb{N}$ primo, y sea $\Phi_p : \mathbb{Z}[X] \rightarrow \mathbb{Z}_p[X]$ definida por

$$\Phi_p(a_n X^n + \cdots + a_0) = \bar{a}_n X^n + \cdots + \bar{a}_0$$

donde \bar{a}_i denota el resto de a_i módulo p .

- i) Probar que $\Phi_p(f) + \Phi_p(g) \equiv \Phi_p(f + g) \pmod{p}$ y $\Phi_p(f) \cdot \Phi_p(g) \equiv \Phi_p(f \cdot g) \pmod{p}$.
- ii) Sea $f \in \mathbb{Z}[X]$ tal que $\Phi_p(f) \neq 0$ y $\text{gr}\Phi_p(f) = \text{gr}f$. Probar que si $\Phi_p(f)$ es irreducible en $\mathbb{Z}_p[X]$, entonces f no se factoriza en $\mathbb{Z}[X]$ en la forma $f = gh$ con g, h de grado mayor o igual que 1.

Ejercicio 21. *Criterio de irreducibilidad de Eisenstein.* Sea A un DFU y sea \mathbb{K} su cuerpo de cocientes. Sea $f = \sum_{i=0}^n a_i X^i \in A[X]$, con $n > 0$. Probar que si existe un primo $p \in A$ que verifica: $p \nmid a_n$, $p \mid a_i \forall 0 \leq i \leq n-1$ y $p^2 \nmid a_0$, entonces f es irreducible en $K[X]$.

Ejercicio 22. *Teorema de Gauss.* Sea A un DFU y sea \mathbb{K} su cuerpo de cocientes. Sea $f = \sum_{i=0}^n a_i X^i \in A[X]$ con $a_0 \neq 0$. Demostrar que si p y q son elementos no nulos de A , coprimos entre sí tales que $\frac{p}{q} \in \mathbb{K}$ es raíz de f , entonces $p \mid a_0$ y $q \mid a_n$ en A .

Ejercicio 23. Sea $p \in \mathbb{Z}$ primo. Probar que:

- i) $(X+1)^p - 1$ es divisible por X y $\frac{(X+1)^p - 1}{X}$ es irreducible en $\mathbb{Q}[X]$.
- ii) $1 + X + X^2 + \dots + X^{p-1}$ es irreducible en $\mathbb{Q}[X]$.
- iii) $X^n - p$ es irreducible en $\mathbb{Q}[X] \forall n \in \mathbb{N}$.
- iv) Si $a \in \mathbb{Z}$ es tal que $p \mid a$ pero $p^2 \nmid a$, entonces $X^n - a$ es irreducible en $\mathbb{Q}[X]$.

Ejercicio 24. Sea \mathbb{K} un cuerpo. Sea $f \in \mathbb{K}[X]$ y sea $a \in \mathbb{K}$ una raíz de f . Probar que a es raíz múltiple de f si y sólo si es raíz de su derivado.

Ejercicio 25. Probar que si $f \in \mathbb{Q}[X]$ es irreducible, entonces f no tiene raíces múltiples en \mathbb{C} .

Ejercicio 26. Determinar todos los polinomios de grado 2, 3, 4 y 5 irreducibles en $\mathbb{Z}_2[X]$.

Ejercicio 27. Sean $a, b \in \mathbb{Z}$.

- i) Probar que $X^3 + aX^2 + bX + 1$ es reducible en $\mathbb{Z}[X]$ sii $a = b$ o $a + b = -2$
- ii) Determinar condiciones necesarias y suficientes para que $X^3 + aX^2 + bX - 1$ sea reducible en $\mathbb{Z}[X]$. Lo mismo para $X^3 + b$.

Ejercicio 28. Sea \mathbb{K} un cuerpo y sea $a \in \mathbb{K}$. Probar que $X^4 - a$ es reducible en $\mathbb{K}[X]$ si y sólo si $a = b^2$ para algún $b \in \mathbb{K}$ o $a = -4c^4$ para algún $c \in \mathbb{K}$.

Ejercicio 29. Analizar la reducibilidad de:

- i) $2X^5 + 18X^3 + 30X^2 - 24$; $X^4 + 4X^2 + 10$; $X^3 - X^2 + 7X + 2$ en $\mathbb{Q}[X]$ y en $\mathbb{Z}[X]$
- ii) $X^4 - 4$; $X^3 + X^2 + X + 1$; $X^5 - 2$; $X^4 + X^3 + 1$; $X^5 + 6X^4 + 5X^2 - 2X + 9$ en $\mathbb{Z}[X]$
- iii) $(X+a)^4 + 1$ en $\mathbb{Q}[X]$ ($a \in \mathbb{Q}$)
- iv) $X^2 + Y^2 + 1$ en $\mathbb{Q}[X, Y]$

Ejercicio 30. Sea \mathbb{K} un cuerpo finito de q elementos. Probar que en $\mathbb{K}[X]$ hay $\frac{q^2 - q}{2}$ polinomios mónicos irreducibles de grado 2