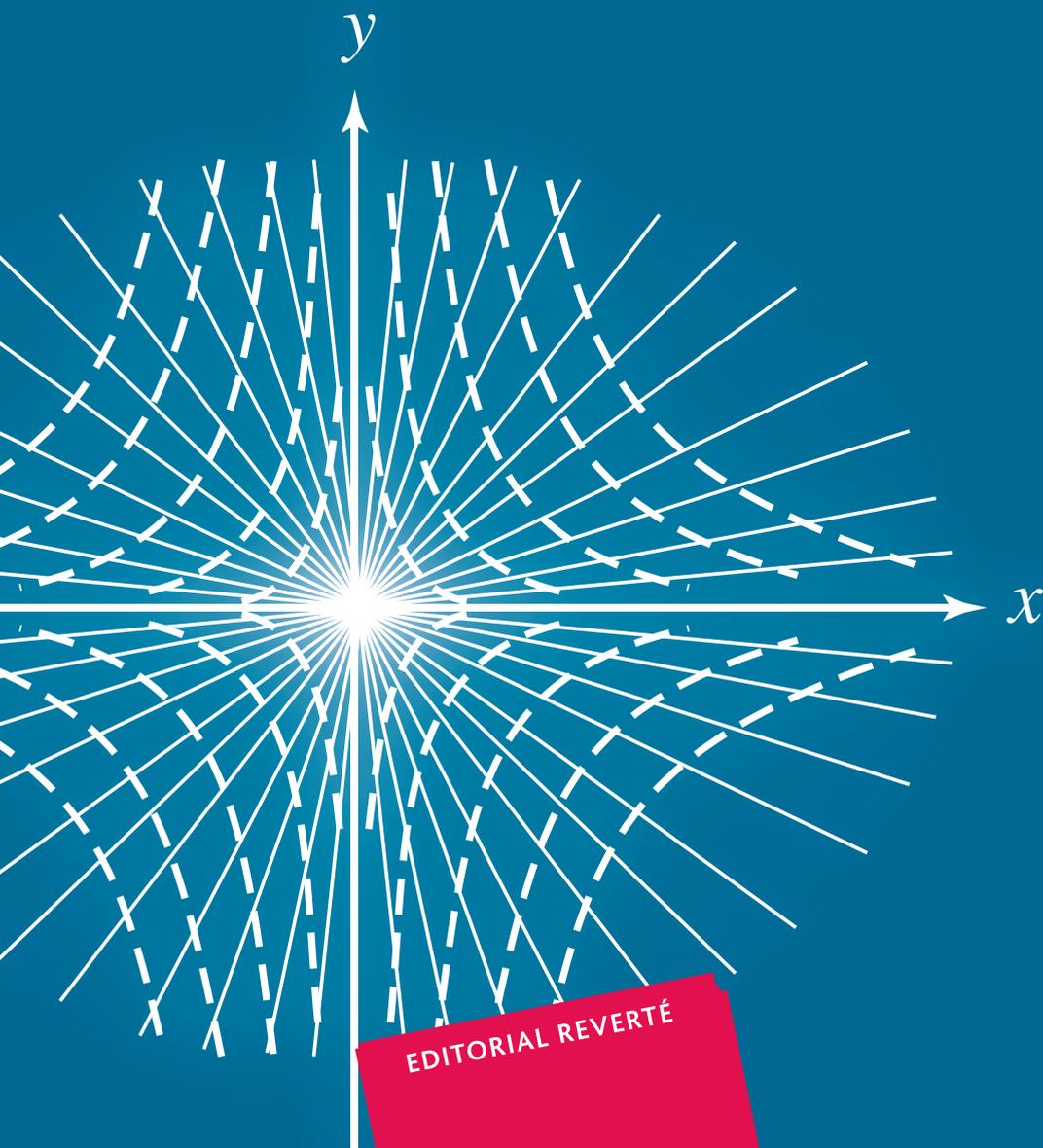


Tom M. Apostol

CALCULUS I

Cálculo con funciones de una variable, con una introducción al Álgebra Lineal



EDITORIAL REVERTÉ

Tom M. Apostol

CALCULUS I

Cálculo con funciones de una variable, con una introducción al Álgebra Lineal



EDITORIAL
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · Caracas · México

Título de la obra original:

**CALCULUS, One – Variable Calculus
with an Introduction to Linear Algebra**

Edición original en lengua inglesa publicada por

Blaisdell Publishing Company, Waltham, Massachusetts, U.S.A.

Copyright © by Blaisdell Publishing Company

Edición en español:

© Editorial Reverté, S. A., 1984

Edición en papel

ISBN: 978-84-291-5002-5 Tomo 1

ISBN: 978-84-291-5001-8 Obra completa

Edición e-book (PDF)

ISBN: 978-84-291-9481-4 Tomo 1

Versión española por:

Dr. D. Francisco Vélez Cantarell

Profesor Adjunto de la Facultad de Ciencias de Barcelona

Revisada por:

Dr. D. Enrique Linés Escardó

Catedrático de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Madrid

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15. Local B

08029 Barcelona. ESPAÑA

Tel: (34) 93 419 33 36

reverte@reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, queda rigurosamente prohibida, salvo excepción prevista en la ley. Asimismo queda prohibida la distribución de ejemplares mediante alquiler o préstamo públicos, la comunicación pública y la transformación de cualquier parte de esta publicación (incluido el diseño de la cubierta) sin la previa autorización de los titulares de la propiedad intelectual y de la Editorial. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (CEDRO) vela por el respeto a los citados derechos.

a

Jane y Stephen

PRÓLOGO

Extracto del prólogo a la primera edición

Parece que no hay acuerdo sobre lo que ha de constituir un primer curso de Cálculo y Geometría Analítica. Unos sostienen que el camino verdadero para entender el Cálculo principia con un estudio completo del sistema de los números reales desarrollándolo paso a paso de manera lógica y rigurosa. Otros insisten en que el Cálculo es ante todo un instrumento para los ingenieros y físicos; y por consiguiente, que un curso debe llevar a las aplicaciones del Cálculo apelando a la intuición, para después, por el ejercicio en la resolución de problemas, alcanzar destreza operatoria. En ambos puntos de vista hay mucha parte de razón. El Cálculo es una ciencia deductiva y una rama de la Matemática pura. Al mismo tiempo es muy importante recordar que el Cálculo tiene profundas raíces en problemas físicos y que gran parte de su potencia y belleza deriva de la variedad de sus aplicaciones. Mas es posible combinar un desarrollo teórico riguroso con una sana formación técnica, y este libro representa un intento de establecer un sensible equilibrio entre las dos tendencias. Aunque se trate el Cálculo como ciencia deductiva, no por eso se abandonan las aplicaciones a problemas físicos. Las demostraciones de todos los teoremas importantes se consideran como una parte esencial en el desarrollo de las ideas matemáticas, y con frecuencia van precedidas de una discusión geométrica o intuitiva para dar al estudiante una visión más penetrante del porqué de la demostración. Aunque estas discusiones intuitivas pueden ser suficientes para el lector que no esté interesado en los detalles de la demostración, también se incluye la demostración completa para aquellos que prefieran una exposición más rigurosa.

La disposición de este libro ha sido sugerida por el desarrollo histórico y filosófico del Cálculo y la Geometría Analítica. Por ejemplo, se estudia la integración antes de la diferenciación. Aunque esta manera de ordenar la materia del curso sea poco frecuente, es históricamente correcta y pedagógicamente adecuada. Además, es el mejor camino para hacer patente la verdadera conexión entre la derivada y la integral.

El concepto de integral se define en primer lugar para funciones escalonadas. Puesto que la integral de una función escalonada no es más que una suma, la

teoría de la integración es extremadamente sencilla en este caso. Mientras el estudiante aprende las propiedades de la integral para funciones escalonadas, adquiere experiencia en el uso de la notación sumación y al mismo tiempo se familiariza con el simbolismo de la integral. De esta manera se van construyendo los peldaños para que la transición de funciones escalonadas a otras funciones más generales parezca fácil y natural.

Prólogo a la segunda edición

La segunda edición difiere de la primera en muchos aspectos. Se ha añadido el Álgebra lineal; los teoremas del valor medio y las aplicaciones del Cálculo se han introducido en los primeros capítulos, y se ha añadido buen número de nuevos y sencillos ejercicios. Una inspección del índice revela que el libro se ha dividido en capítulos de menor extensión, desarrollándose cada uno sobre un concepto importante. Varias secciones han sido escritas de nuevo y reorganizadas para proporcionar una mejor fundamentación y mejorar la fluidez de las ideas.

Al igual que en la primera edición, cada concepto nuevo importante viene precedido de una introducción histórica, que describe su desarrollo desde una primera noción física intuitiva hasta su formulación matemática precisa. El estudiante descubre en parte los esfuerzos del pasado y los triunfos de los hombres que más han contribuido al tema. De este modo el estudiante se convierte en participante activo en la evolución de las ideas y no queda como mero observador pasivo de los resultados.

La segunda edición, como la primera, está dividida en dos volúmenes. Las dos terceras partes primeras del Volumen I tratan del Cálculo con funciones de una variable, incluyendo las series y una introducción a las ecuaciones diferenciales. La última tercera parte del Volumen I introduce el Álgebra lineal con aplicaciones a la Geometría y al Análisis. Gran parte de estos temas se apoya sólidamente en el cálculo de ejemplos que ilustran la teoría general. Ello proporciona una mezcla de Álgebra y de Análisis y contribuye a preparar el camino para la transición del Cálculo con una variable al Cálculo con varias variables, que se trata en el Volumen II. Un desarrollo más amplio de Álgebra lineal se hará necesario en la segunda edición del Volumen II.

Una vez más reconozco con agrado mi deuda con los profesores H. F. Bohnenblust, A. Erdélyi, F. B. Fuller, K. Hoffman, G. Springer, y H. S. Zuckerman. Su influencia en la primera edición ha continuado en la segunda. En la preparación de la segunda edición, recibí también la ayuda del profesor Basil Gordon, que sugirió muchas mejoras. Estoy también agradecido a George Springer y William P. Ziemer, que leyeron las últimas pruebas. El personal de Blaisdell Publishing Company, como siempre, ha prestado una gran ayuda; aprecio su simpática aceptación de mis deseos en lo relativo al formato y a la tipografía.

Por último, tengo especial satisfacción en expresar mi gratitud a mi esposa por haber contribuido en diversas formas a la preparación de las dos ediciones. En testimonio de mi agradecimiento le dedico este libro.

T. M. A.

Pasadena, California

ÍNDICE ANALÍTICO

I. INTRODUCCIÓN

Parte 1. Introducción histórica

I 1.1	Los dos conceptos básicos del Cálculo	1
I 1.2	Introducción histórica	3
I 1.3	El método de exhaución para el área de un segmento de parábola	4
*I 1.4	Ejercicios	9
I 1.5	Análisis crítico del método de Arquímedes	10
I 1.6	La introducción al Cálculo que se utiliza en este libro	12

Parte 2. Conceptos básicos de la teoría de conjuntos

I 2.1	Introducción a la teoría de conjuntos	13
I 2.2	Notaciones para designar conjuntos	14
I 2.3	Subconjuntos	15
I 2.4	Reuniones, intersecciones, complementos	17
I 2.5	Ejercicios	19

Parte 3. Un conjunto de axiomas para el sistema de números reales

I 3.1	Introducción	21
I 3.2	Axiomas de cuerpo	22
*I 3.3	Ejercicios	24
I 3.4	Axiomas de orden	24
*I 3.5	Ejercicios	26
I 3.6	Números enteros y racionales	26
I 3.7	Interpretación geométrica de los números reales como puntos de una recta	28
I 3.8	Cota superior de un conjunto, elemento máximo, extremo superior	28
I 3.9	Axioma del extremo superior (axioma de completitud)	30

I 3.10	La propiedad arquimediana del sistema de los números reales	32
I 3.11	Propiedades fundamentales del extremo superior	33
*I 3.12	Ejercicios	34
*I 3.13	Existencia de raíces cuadradas de los números reales no negativos	35
*I 3.14	Raíces de orden superior. Potencias racionales	36
*I 3.15	Representación de los números reales por medio de decimales	37

*Parte 4. Inducción matemática, símbolos
sumatorios y cuestiones relacionadas*

I 4.1	Ejemplo de demostración por inducción matemática	40
I 4.2	El principio de la inducción matemática	41
*I 4.3	El principio de buena ordenación	42
I 4.4	Ejercicios	44
*I 4.5	Demostración del principio de buena ordenación	45
I 4.6	El símbolo sumatorio	46
I 4.7	Ejercicios	49
I 4.8	Valor absoluto y desigualdad triangular	50
I 4.9	Ejercicios	53
*I 4.10	Ejercicios varios referentes al método de inducción	54

1. LOS CONCEPTOS DEL CÁLCULO INTEGRAL

1.1	Las ideas básicas de la Geometría cartesiana	59
1.2	Funciones. Ideas generales y ejemplos	61
*1.3	Funciones. Definición formal como conjunto de pares ordenados	65
1.4	Más ejemplos de funciones reales	66
1.5	Ejercicios	69
1.6	El concepto de área como función de conjunto	70
1.7	Ejercicios	73
1.8	Intervalos y conjuntos de ordenadas	74
1.9	Particiones y funciones escalonadas	75
1.10	Suma y producto de funciones escalonadas	77
1.11	Ejercicios	78
1.12	Definición de integral para funciones escalonadas	79
1.13	Propiedades de la integral de una función escalonada	81
1.14	Otras notaciones para las integrales	85
1.15	Ejercicios	86
1.16	La integral de funciones más generales	88
1.17	Integrales superior e inferior	91
1.18	El área de un conjunto de ordenadas expresada como una integral	92

1.19	Observaciones relativas a la teoría y técnica de la integración	93
1.20	Funciones monótonas y monótonas a trozos. Definiciones y ejemplos	94
1.21	Integrabilidad de funciones monótonas acotadas	95
1.22	Cálculo de la integral de una función monótona acotada	97
1.23	Cálculo de la integral $\int_0^b x^p dx$ siendo p entero positivo	98
1.24	Propiedades fundamentales de la integral	99
1.25	Integración de polinomios	101
1.26	Ejercicios	102
1.27	Demostraciones de las propiedades fundamentales de la integral	104

2. ALGUNAS APLICACIONES DE LA INTEGRACIÓN

2.1	Introducción	109
2.2	El área de una región comprendida entre dos gráficas expresada como una integral	109
2.3	Ejemplos resueltos	111
2.4	Ejercicios	116
2.5	Las funciones trigonométricas	117
2.6	Fórmulas de integración para el seno y el coseno	121
2.7	Descripción geométrica de las funciones seno y coseno	126
2.8	Ejercicios	129
2.9	Coordenadas polares	133
2.10	La integral para el área en coordenadas polares	134
2.11	Ejercicios	136
2.12	Aplicación de la integración al cálculo de volúmenes	137
2.13	Ejercicios	140
2.14	Aplicación de la integración al concepto de trabajo	141
2.15	Ejercicios	144
2.16	Valor medio de una función	145
2.17	Ejercicios	147
2.18	La integral como función del límite superior. Integrales indefinidas	148
2.19	Ejercicios	153

3. FUNCIONES CONTINUAS

3.1	Idea intuitiva de continuidad	155
3.2	Definición de límite de una función	156
3.3	Definición de continuidad de una función	160
3.4	Teoremas fundamentales sobre límites. Otros ejemplos de funciones continuas	162
3.5	Demostraciones de los teoremas fundamentales sobre límites	167

3.6	Ejercicios	169
3.7	Funciones compuestas y continuidad	172
3.8	Ejercicios	174
3.9	Teorema de Bolzano para las funciones continuas	175
3.10	Teorema del valor intermedio para funciones continuas	177
3.11	Ejercicios	178
3.12	El proceso de inversión	179
3.13	Propiedades de las funciones que se conservan por la inversión	180
3.14	Inversas de funciones monótonas a trozos	182
3.15	Ejercicios	183
3.16	Teorema de los valores extremos para funciones continuas	184
3.17	Teorema de la continuidad uniforme	186
3.18	Teorema de integrabilidad para funciones continuas	187
3.19	Teoremas del valor medio para funciones continuas	189
3.20	Ejercicios	190

4. CÁLCULO DIFERENCIAL

4.1	Introducción histórica	191
4.2	Un problema relativo a velocidad	192
4.3	Derivada de una función	195
4.4	Ejemplos de derivadas	197
4.5	Álgebra de las derivadas	201
4.6	Ejercicios	204
4.7	Interpretación geométrica de la derivada como una pendiente	207
4.8	Otras notaciones para las derivadas	209
4.9	Ejercicios	211
4.10	Regla de la cadena para la derivación de funciones compuestas	213
4.11	Aplicaciones de la regla de la cadena. Coeficientes de variación ligados y derivación implícita	216
4.12	Ejercicios	219
4.13	Aplicaciones de la derivación a la determinación de los extremos de las funciones	221
4.14	Teorema del valor medio para derivadas	224
4.15	Ejercicios	227
4.16	Aplicaciones del teorema del valor medio a propiedades geométricas de las funciones	228
4.17	Criterio de la derivada segunda para los extremos	230
4.18	Trazado de curvas	231
4.19	Ejercicios	233
4.20	Ejemplos resueltos de problemas de extremos	234
4.21	Ejercicios	237

*4.22	Derivadas parciales	239
*4.23	Ejercicios	245

5. RELACIÓN ENTRE INTEGRACIÓN Y DERIVACIÓN

5.1	La derivada de una integral indefinida. Primer teorema fundamental del cálculo	247
5.2	Teorema de la derivada nula	250
5.3	Funciones primitivas y segundo teorema fundamental del cálculo	250
5.4	Propiedades de una función deducidas de propiedades de su derivada	253
5.5	Ejercicios	254
5.6	La notación de Leibniz para las primitivas	257
5.7	Integración por sustitución	259
5.8	Ejercicios	264
5.9	Integración por partes	266
5.10	Ejercicios	269
*5.11	Ejercicios de repaso	272

6. FUNCIÓN LOGARITMO, FUNCIÓN EXPONENCIAL Y FUNCIONES TRIGONOMÉTRICAS INVERSAS

6.1	Introducción	277
6.2	Definición del logaritmo natural como integral	278
6.3	Definición de logaritmo. Propiedades fundamentales	281
6.4	Gráfica del logaritmo natural	282
6.5	Consecuencias de la ecuación funcional $L(ab) = L(a) + L(b)$	282
6.6	Logaritmos referidos a una base positiva $b \neq 1$	284
6.7	Fórmulas de derivación e integración en las que intervienen logaritmos	286
6.8	Derivación logarítmica	288
6.9	Ejercicios	289
6.10	Polinomios de aproximación para el logaritmo	291
6.11	Ejercicios	296
6.12	La función exponencial	296
6.13	Exponenciales expresadas como potencias de e	298
6.14	Definición de e^x para x real cualquiera	299
6.15	Definición de a^x para $a > 0$ y x real	300
6.16	Fórmulas de derivación e integración en las que intervienen exponenciales	300

6.17	Ejercicios	304
6.18	Funciones hiperbólicas	307
6.19	Ejercicios	308
6.20	Derivadas de funciones inversas	308
6.21	Inversas de las funciones trigonométricas	309
6.22	Ejercicios	314
6.23	Integración por fracciones simples	316
6.24	Integrales que pueden transformarse en integrales de funciones racionales	323
6.25	Ejercicios	326
6.26	Ejercicios de repaso	328

7. APROXIMACIÓN DE FUNCIONES POR POLINOMIOS

7.1	Introducción	333
7.2	Polinomios de Taylor engendrados por una función	335
7.3	Cálculo con polinomios de Taylor	337
7.4	Ejercicios	340
7.5	Fórmula de Taylor con resto	341
7.6	Estimación del error en la fórmula de Taylor	342
*7.7	Otras formas de la fórmula de Taylor con resto	347
7.8	Ejercicios	348
7.9	Otras observaciones sobre el error en la fórmula de Taylor. La notación o -	350
7.10	Aplicaciones a las formas indeterminadas	354
7.11	Ejercicios	356
7.12	Regla de L'Hôpital para la forma indeterminada $0/0$	357
7.13	Ejercicios	362
7.14	Los símbolos $+\infty$ y $-\infty$. Extensión de la regla de L'Hôpital	363
7.15	Límites infinitos	366
7.16	Comportamiento de $\log x$ y e^x para valores grandes de x	368
7.17	Ejercicios	371

8. INTRODUCCIÓN A LAS ECUACIONES DIFERENCIALES

8.1	Introducción	373
8.2	Terminología y notación	374
8.3	Ecuación diferencial de primer orden para la función exponencial	376
8.4	Ecuaciones diferenciales lineales de primer orden	377
8.5	Ejercicios	381

8.6	Algunos problemas físicos que conducen a ecuaciones diferenciales de primer orden	382
8.7	Ejercicios	390
8.8	Ecuaciones lineales de segundo orden con coeficientes constantes	394
8.9	Existencia de soluciones de la ecuación $y'' + by = 0$	395
8.10	Reducción de la ecuación general al caso particular $y'' + by = 0$	396
8.11	Teorema de unicidad para la ecuación $y'' + by = 0$	397
8.12	Solución completa de la ecuación $y'' + by = 0$	398
8.13	Solución completa de la ecuación $y'' + ay' + by = 0$	399
8.14	Ejercicios	401
8.15	Ecuaciones lineales no homogéneas de segundo orden con coeficientes constantes	402
8.16	Métodos particulares para la determinación de una solución particular de la ecuación no homogénea $y'' + ay' + by = R$	406
8.17	Ejercicios	408
8.18	Ejemplos de problemas físicos que conducen a ecuaciones lineales de segundo orden con coeficientes constantes	408
8.19	Ejercicios	414
8.20	Observaciones relativas a las ecuaciones diferenciales no lineales	416
8.21	Curvas integrales y campos direccionales	417
8.22	Ejercicios	421
8.23	Ecuaciones separables de primer orden	422
8.24	Ejercicios	424
8.25	Ecuaciones homogéneas de primer orden	425
8.26	Ejercicios	429
8.27	Algunos problemas físicos y geométricos que conducen a ecuaciones de primer orden	429
8.28	Ejercicios de repaso	434

9. NÚMEROS COMPLEJOS

9.1	Introducción histórica	437
9.2	Definiciones y propiedades	437
9.3	Los números complejos como una extensión de los números reales	440
9.4	La unidad imaginaria i	441
9.5	Interpretación geométrica. Módulo y argumento	443
9.6	Ejercicios	445
9.7	Exponenciales complejas	446
9.8	Funciones complejas	449
9.9	Ejemplos de fórmulas de derivación e integración	451
9.10	Ejercicios	453

10. SUCESIONES, SERIES, INTEGRALES IMPROPIAS

10.1	La paradoja de Zenón	457
10.2	Sucesiones	462
10.3	Sucesiones monótonas de números reales	465
10.4	Ejercicios	467
10.5	Series infinitas	469
10.6	Propiedad de linealidad de las series convergentes	471
10.7	Series telescópicas	472
10.8	Serie geométrica	474
10.9	Ejercicios	477
*10.10	Ejercicios con expresiones decimales	479
10.11	Criterios de convergencia	480
10.12	Criterios de comparación para series de términos no negativos	482
10.13	El criterio integral	484
10.14	Ejercicios	486
10.15	Criterios de la raíz y del cociente para series de términos no negativos	487
10.16	Ejercicios	490
10.17	Series alternadas	492
10.18	Convergencia condicional y absoluta	496
10.19	Criterios de convergencia de Dirichlet y Abel	496
10.20	Ejercicios	499
*10.21	Reordenación de series	501
10.22	Ejercicios varios de repaso	506
10.23	Integrales impropias	508
10.24	Ejercicios	513

11. SUCESIONES Y SERIES DE FUNCIONES

11.1	Convergencia puntual de sucesiones de funciones	517
11.2	Convergencia uniforme de sucesiones de funciones	519
11.3	Convergencia uniforme y continuidad	520
11.4	Convergencia uniforme e integración	521
11.5	Una condición suficiente para la convergencia uniforme	522
11.6	Series de potencias. Círculo de convergencia	524
11.7	Ejercicios	526
11.8	Propiedades de las funciones representadas por series reales de potencias	528
11.9	Serie de Taylor generada por una función	532
11.10	Condición suficiente para la convergencia de una serie de Taylor	532

11.11	Desarrollos en serie de potencias de las funciones exponencial y trigonométricas	533
*11.12	Teorema de Bernstein	535
11.13	Ejercicios	536
11.14	Series de potencias y ecuaciones diferenciales	538
11.15	La serie binómica	541
11.16	Ejercicios	542

12. ÁLGEBRA VECTORIAL

12.1	Introducción histórica	545
12.2	El espacio vectorial de las n -plas de números reales	546
12.3	Interpretación geométrica para $n \leq 3$	549
12.4	Ejercicios	551
12.5	Producto escalar	552
12.6	Longitud o norma de un vector	554
12.7	Ortogonalidad de vectores	557
12.8	Ejercicios	558
12.9	Proyecciones. Ángulo de dos vectores en el espacio de n dimensiones	559
12.10	Los vectores coordenados unitarios	561
12.11	Ejercicios	563
12.12	Envoltente lineal de un conjunto finito de vectores	565
12.13	Independencia lineal	567
12.14	Bases	570
12.15	Ejercicios	571
12.16	El espacio vectorial $V_n(\mathbf{C})$ de n -plas de números complejos	573
12.17	Ejercicios	575

13. APLICACIONES DEL ÁLGEBRA VECTORIAL A LA GEOMETRÍA ANALÍTICA

13.1	Introducción	577
13.2	Rectas en el espacio n -dimensional	578
13.3	Algunas propiedades sencillas de las rectas	579
13.4	Rectas y funciones vectoriales	581
13.5	Ejercicios	584
13.6	Planos en el espacio euclídeo n -dimensional	585
13.7	Planos y funciones vectoriales	589
13.8	Ejercicios	590
13.9	Producto vectorial	591

13.10	El producto vectorial expresado en forma de determinante	595
13.11	Ejercicios	597
13.12	Producto mixto	598
13.13	Regla de Cramer para resolver un sistema de tres ecuaciones lineales	601
13.14	Ejercicios	602
13.15	Vectores normales a planos	604
13.16	Ecuaciones lineales cartesianas para planos	606
13.17	Ejercicios	607
13.18	Las secciones cónicas	609
13.19	Excentricidad de las secciones cónicas	612
13.20	Ecuaciones polares de las cónicas	614
13.21	Ejercicios	615
13.22	Cónicas simétricas respecto al origen	616
13.23	Ecuaciones cartesianas de las cónicas	618
13.24	Ejercicios	621
13.25	Ejercicios varios sobre cónicas	623

14. CÁLCULO CON FUNCIONES VECTORIALES

14.1	Funciones vectoriales de una variable real	627
14.2	Operaciones algebraicas. Componentes	627
14.3	Límites, derivadas e integrales	628
14.4	Ejercicios	632
14.5	Aplicaciones a las curvas. Tangencia	633
14.6	Aplicaciones al movimiento curvilíneo. Vector velocidad, velocidad y aceleración	637
14.7	Ejercicios	641
14.8	Vector tangente unitario, normal principal y plano osculador a una curva	643
14.9	Ejercicios	646
14.10	Definición de longitud de un arco	648
14.11	Aditividad de la longitud de arco	651
14.12	Función longitud de arco	652
14.13	Ejercicios	655
14.14	Curvatura de una curva	657
14.15	Ejercicios	659
14.16	Los vectores velocidad y aceleración en coordenadas polares	660
14.17	Movimiento plano con aceleración radial	663
14.18	Coordenadas cilíndricas	664
14.19	Ejercicios	665

14.20	Aplicaciones al movimiento planetario	667
14.21	Ejercicios de repaso	671

15. ESPACIOS LINEALES

15.1	Introducción	675
15.2	Definición de espacio lineal	675
15.3	Ejemplos de espacios lineales	677
15.4	Consecuencias elementales de los axiomas	679
15.5	Ejercicios	680
15.6	Subespacios de un espacio lineal	681
15.7	Conjuntos dependientes e independientes, en un espacio lineal	683
15.8	Bases y dimensión	685
15.9	Ejercicios	686
15.10	Productos interiores, espacios euclídeos. Normas	687
15.11	Ortogonalidad en un espacio euclídeo	691
15.12	Ejercicios	694
15.13	Construcción de conjuntos ortogonales. Método de Gram-Schmidt	696
15.14	Complementos ortogonales. Proyecciones	701
15.15	Aproximación óptima de elementos de un espacio euclídeo por elementos de un subespacio de dimensión finita	704
15.16	Ejercicios	706

16. TRANSFORMACIONES LINEALES Y MATRICES

16.1	Transformaciones lineales	709
16.2	Núcleo y recorrido	711
16.3	Dimensión del núcleo y rango de la transformación	712
16.4	Ejercicios	714
16.5	Operaciones algebraicas con transformaciones lineales	716
16.6	Inversas	718
16.7	Transformaciones lineales uno a uno	721
16.8	Ejercicios	723
16.9	Transformaciones lineales con valores asignados	725
16.10	Representación matricial de las transformaciones lineales	726
16.11	Construcción de una representación matricial en forma diagonal	730
16.12	Ejercicios	732
16.13	Espacios lineales de matrices	733
16.14	Isomorfismo entre transformaciones lineales y matrices	735
16.15	Multiplicación de matrices	736
16.16	Ejercicios	740

16.17	Sistemas de ecuaciones lineales	742
16.18	Técnicas de cálculo	745
16.19	Inversas de matrices cuadradas	750
16.20	Ejercicios	752
16.21	Ejercicios varios sobre matrices	754
	Soluciones a los ejercicios	757
	Índice alfabético	805

INTRODUCCIÓN

Parte I. - Introducción histórica

I 1.1 Los dos conceptos básicos del Cálculo

El considerable progreso habido en la ciencia y en la técnica durante los últimos cien años procede en gran parte del desarrollo de las Matemáticas. La rama de la Matemática conocida por Cálculo integral y diferencial es un instrumento natural y poderoso para atacar múltiples problemas que surgen en Física, Astronomía, Ingeniería, Química, Geología, Biología, y en otros campos, incluyendo recientemente algunos de Ciencias sociales.

Para dar una idea al lector de los muy diversos tipos de problemas que pueden tratarse por los métodos de Cálculo se expone a continuación una pequeña muestra de cuestiones seleccionadas entre los ejercicios que aparecen en capítulos posteriores de este libro.

¿Con qué velocidad debería ser impulsado un cohete para que nunca volviera a la Tierra? ¿Cuál es el radio del menor disco circular que cubra a todo triángulo isósceles de perímetro L ? ¿Cuál es el volumen de material extraído de una esfera de radio $2r$ al atravesarla por un orificio cilíndrico de radio r cuyo eje pase por el centro de la esfera? Si un cultivo de bacterias crece en razón directa a la cantidad que hay en cada instante, y la población se duplica en una hora, ¿en cuánto se habrá incrementado al cabo de dos horas? Si una fuerza de diez libras estira una cuerda elástica una pulgada, ¿qué trabajo se necesita para estirla un pie?

Estos ejemplos, elegidos en distintos campos, ilustran algunas de las cuestiones técnicas que pueden ser resueltas como aplicaciones más o menos rutinarias del Cálculo.

El Cálculo no sólo es un instrumento técnico, sino que contiene una colección de ideas fascinadoras y atrayentes que han ocupado el pensamiento humano durante centurias. Estas ideas están relacionadas con *velocidad*, *área*, *volumen*, *razón de crecimiento*, *tangente a una línea*, y con otros conceptos referentes a otros dominios. El Cálculo obliga a detenerse y a pensar cuidadosamente acerca del significado de estos conceptos. Otro carácter notable del Cálculo es su poder

unificador. Muchos de estos problemas pueden ser formulados de manera que se reduzcan a otros problemas de naturaleza puramente geométrica. A continuación se procede a una breve descripción de tales problemas.

Considérese una curva C situada encima de una línea horizontal base, como se indica en la figura I.1. Se supone que esta curva tiene la propiedad de ser cortada por cada vertical, en un punto a lo más. La parte sombreada de la figura está formada por aquellos puntos situados por debajo de la curva C , encima de la horizontal, y entre dos segmentos verticales paralelos que unen C con la base. El primer problema fundamental del Cálculo es el siguiente: *Determinar un número que mida el área de esta región sombreada.*

Considérese después una recta que sea tangente a la curva, tal como se ve en la figura I.1. El segundo problema fundamental puede formularse de la siguiente manera: *Determinar un número que mida la pendiente de esta recta.*

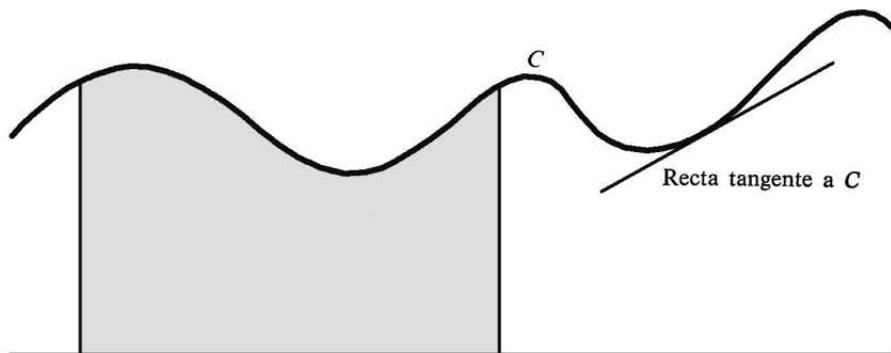


FIGURA I.1

Fundamentalmente, el Cálculo se ocupa en la formulación precisa y la resolución de estos dos problemas considerados. En el Cálculo se *definen* los conceptos de área y tangente y se *calculan* el área de una región dada y la pendiente de la tangente a una curva dada. El *Cálculo integral* se ocupa del problema del área y será discutido en este capítulo 1. El *Cálculo diferencial* se ocupa del problema de la tangente y será introducido en el capítulo 4.

El estudio del Cálculo exige una cierta preparación matemática. El presente capítulo trata de estos conceptos básicos y está dividido en cuatro partes: La 1.^a parte da una perspectiva histórica; la 2.^a se refiere a la notación y terminología en la matemática de conjuntos; la 3.^a trata del sistema de números reales; la 4.^a ofrece la inducción matemática y la notación sumatoria. Si el lector está informado de estos temas, puede abordar directamente el desarrollo del Cálculo integral en el capítulo 1. Si no, deberá familiarizarse con las materias contenidas en esta introducción antes de iniciar el capítulo 1.

I 1.2 Introducción histórica

El origen del Cálculo integral se remonta a más de 2000 años, cuando los griegos intentaban resolver el problema del área ideando el procedimiento que llamaron *método de exhaución*. Las ideas esenciales de este método son realmente muy simples y se pueden describir brevemente como sigue: Dada una región cuya área quiere determinarse, se inscribe en ella una región poligonal que se aproxime a la dada y cuya área sea de fácil cálculo. Luego se elige otra región poligonal que dé una aproximación mejor y se continúa el proceso tomando polígonos con mayor número de lados cada vez, tendiendo a llenar la región dada. La figura I.2 es una ilustración del método en el caso de una región semicircular. Este método fue usado satisfactoriamente por Arquímedes (287-212 A.C.) para hallar fórmulas exactas de las áreas del círculo y de algunas otras figuras especiales.

Desde Arquímedes, el desarrollo del método de exhaución tuvo que esperar casi 18 siglos, hasta que el uso de símbolos y técnicas algebraicas se hizo preciso en los estudios matemáticos. El Álgebra elemental que hoy día es familiar a la mayoría de los alumnos de los últimos cursos de enseñanza secundaria, era totalmente desconocida en tiempos de Arquímedes, lo que hacía imposible extender el método a cualquier clase de regiones, sin poseer manera adecuada de poder expresar los largos cálculos en forma simplificada.



FIGURA I.2 El método de exhaución aplicado a una región semicircular.

Un cambio lento pero revolucionario, en el desarrollo de las notaciones matemáticas, empezó en el siglo XVI D.C. El engorroso sistema de numeración romano fue desplazado gradualmente por los caracteres arábigos utilizados hoy día; los signos $+$ y $-$ fueron introducidos por primera vez, y se empezaron a reconocer las ventajas de la notación decimal. Durante este mismo período, los brillantes resultados de los matemáticos italianos Tartaglia, Cardano y Ferrari que dieron soluciones algebraicas a las ecuaciones cúbica y cuártica, estimuló el desarrollo de la Matemática y animó a la aceptación del lenguaje algebraico nuevo y superior. Con la introducción muy extendida de los bien elegidos símbolos algebraicos, revivió el interés por el antiguo método de exhaución y en el siglo XVI descubrieron múltiples resultados parciales, los que como Cavalieri, Toricelli, Roberval, Fermat, Pascal y Wallis fueron pioneros.

Gradualmente, el método de exhaución fue transformándose en lo que hoy se conoce como Cálculo integral, nueva y potente disciplina que tiene numerosísimas aplicaciones no sólo en problemas relativos a áreas y volúmenes, sino también en problemas de otras ciencias. Este método, que mantiene alguno de los caracteres originales del método de exhaución, recibió su mayor impulso en el siglo XVII, debido a los esfuerzos de Isaac Newton (1642-1727) y Gottfried Leibniz (1646-1716), y su desarrollo continuó durante el siglo XIX, hasta que Augustin-Louis Cauchy (1789-1857) y Bernhard Riemann (1826-1866) le dieron una base matemática firme. Posteriores afinamientos y extensiones de la teoría han llegado hasta la Matemática contemporánea.

I 1.3 El método de exhaución para el área de un segmento de parábola

Antes de proceder al estudio sistemático del Cálculo integral, será instructivo aplicar el método de exhaución directamente a una de las figuras particulares tratadas por el mismo Arquímedes. La región en cuestión está presentada en la figura I.3 y puede describirse como sigue: Si se elige un punto arbitrario de la base de la figura y se designa por x su distancia a 0, la distancia vertical de este punto a la curva es x^2 . En particular, si la longitud de la base es b la altura de la figura es b^2 . La distancia vertical de x a la curva se denomina «ordenada» de x . La curva así descrita se denomina *parábola* y la región limitada por ella y por los dos segmentos rectilíneos, se llama *segmento parabólico*.

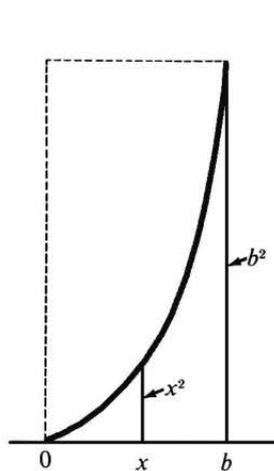


FIGURA I.3 Segmento parabólico

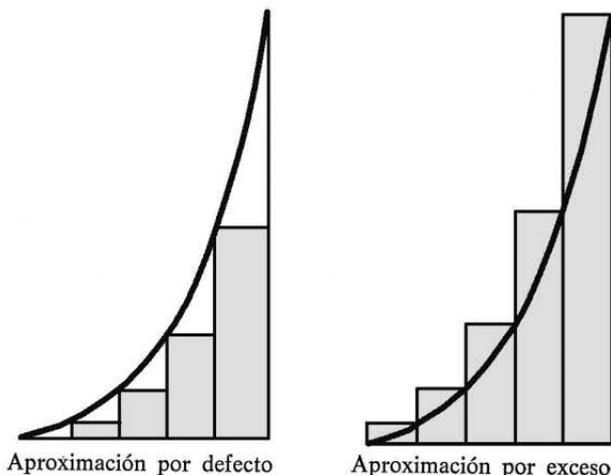


FIGURA I.4

Esta figura puede encerrarse en un rectángulo de base b y altura b^2 , como se ve en la figura I.3. Observando la figura parece natural afirmar que el área del segmento parabólico es menor que la mitad del área del rectángulo. Arquímedes hizo el sorprendente descubrimiento de que el área del segmento parabólico es exactamente *un tercio* de la del rectángulo; es decir, $A = b^3/3$, donde A designa el área del segmento parabólico. Se verá a continuación cómo se llega a este resultado.

Se hace notar que el segmento parabólico dibujado en la figura I.3 no está elegido exactamente tal como lo dibujó Arquímedes y que los detalles que

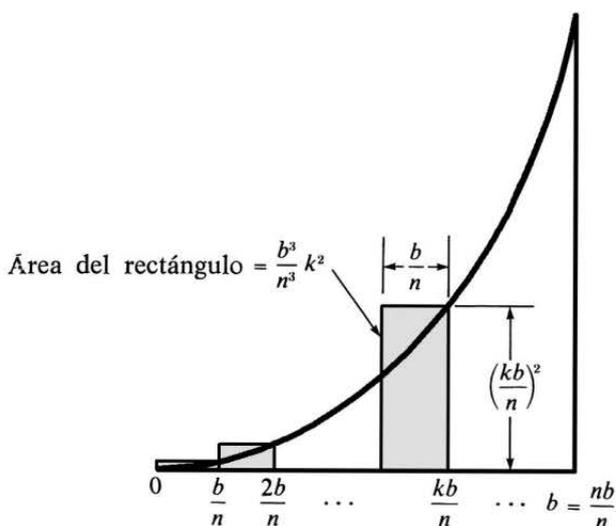


FIGURA I.5 Cálculo del área de un segmento parabólico.

siguen no son exactamente los utilizados por él. Sin embargo, las *ideas* esenciales son las de Arquímedes; lo que aquí se expone puede considerarse como el método de exhaución expuesto con la notación moderna.

El método consiste simplemente en lo siguiente: se divide la figura en un cierto número de bandas y se obtienen dos aproximaciones de la región, una por defecto y otra por exceso, utilizando dos conjuntos de rectángulos como se indica en la figura I.4. (Se utilizan rectángulos mejor que polígonos arbitrarios para simplificar los cálculos.) El área del segmento parabólico es mayor que el área total de los rectángulos interiores pero menor que la de los rectángulos exteriores.

Si cada banda se subdivide a su vez, se obtiene una nueva aproximación con mayor número de bandas, la reunión de las áreas de los rectángulos inte-

riores *crece*, mientras que el total de las áreas de los rectángulos exteriores *decrece*. Arquímedes vio que se podía lograr el área con el grado de aproximación deseado sin más que tomar un número suficiente de bandas.

El cálculo efectivo en este caso se realiza como se indica a continuación. Con objeto de simplificar se subdivide la base en n partes iguales, cada una de longitud b/n (véase fig. I.5). Los puntos de subdivisión corresponden a los siguientes valores de x :

$$0, \frac{b}{n}, \frac{2b}{n}, \frac{3b}{n}, \dots, \frac{(n-1)b}{n}, \frac{nb}{n} = b.$$

La expresión general de un punto de la subdivisión es $x = kb/n$, donde k toma los valores sucesivos $k = 0, 1, 2, 3, \dots, n$. En cada punto kb/n se construye el rectángulo exterior de altura $(kb/n)^2$ como se indica en la figura I.5. El área de este rectángulo es el producto de la base por la altura y es igual a:

$$\left(\frac{b}{n}\right)\left(\frac{kb}{n}\right)^2 = \frac{b^3}{n^3} k^2.$$

Si se designa por S_n la suma de las áreas de todos los rectángulos exteriores, puesto que el área del rectángulo k -simo es $(b^3/n^3)k^2$ se tiene la fórmula:

$$(I.1) \quad S_n = \frac{b^3}{n^3} (1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + n^2).$$

De forma análoga se obtiene la fórmula para la suma s_n de todos los rectángulos interiores:

$$(I.2) \quad s_n = \frac{b^3}{n^3} [1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + (n-1)^2].$$

La forma de estas sumas es de gran importancia para su cálculo. Nótese que el factor que multiplica a b^3/n^3 en la ecuación (I.1) es la suma de los cuadrados de los n primeros números naturales:

$$1^2 + 2^2 + \dots + n^2.$$

(El factor correspondiente en la ecuación (I.2) es análogo salvo que la suma tiene únicamente $n-1$ sumandos.) Para valores grandes de n la obtención de esta suma por adición directa de sus sumandos es pesada, pero afortunada-

mente existe una interesante identidad que hace posible obtener esta suma por un camino más simple, y es la siguiente:

$$(I.3) \quad 1^2 + 2^2 + \cdots + n^2 = \frac{n^3}{3} + \frac{n^2}{2} + \frac{n}{6}.$$

Esta identidad es válida para todo entero $n \geq 1$ y puede demostrarse del siguiente modo: Se parte de la fórmula $(k+1)^3 = k^3 + 3k^2 + 3k + 1$ y se pone en la forma

$$3k^2 + 3k + 1 = (k+1)^3 - k^3.$$

Haciendo $k=1, 2, \dots, n-1$, obtenemos las $n-1$ fórmulas

$$3 \cdot 1^2 + 3 \cdot 1 + 1 = 2^3 - 1^3$$

$$3 \cdot 2^2 + 3 \cdot 2 + 1 = 3^3 - 2^3$$

.

.

.

$$3(n-1)^2 + 3(n-1) + 1 = n^3 - (n-1)^3.$$

Al sumar estas fórmulas, todos los términos del segundo miembro se reducen excepto dos y se obtiene

$$3[1^2 + 2^2 + \cdots + (n-1)^2] + 3[1 + 2 + \cdots + (n-1)] + (n-1) = n^3 - 1^3.$$

La segunda suma del primer miembro es la suma de los términos de una progresión aritmética cuyo valor es $\frac{1}{2}n(n-1)$. Por tanto la última igualdad nos da

$$(I.4) \quad 1^2 + 2^2 + \cdots + (n-1)^2 = \frac{n^3}{3} - \frac{n^2}{2} + \frac{n}{6}.$$

Sumando n^2 a los dos miembros, obtenemos (I.3).

Las expresiones exactas dadas en los segundos miembros de (I.3) y (I.4) no son necesarias para el objeto que aquí se persigue, pero sirven para deducir fácilmente las dos *desigualdades* que interesan

$$(I.5) \quad 1^2 + 2^2 + \cdots + (n-1)^2 < \frac{n^3}{3} < 1^2 + 2^2 + \cdots + n^2$$

que son válidas para todo entero $n \geq 1$. Estas desigualdades pueden deducirse fácilmente como consecuencias de (I.3) y (I.4), o directamente por inducción. (Véase la Sección I 4.1.)

Multiplicando ambas desigualdades en (I.5) por b^3/n^3 y haciendo uso de (I.1) y (I.2) se tiene:

$$(I.6) \quad s_n < \frac{b^3}{3} < S_n$$

para cada n , y observándose que se presenta por primera vez el número $b^3/3$. Las desigualdades en (I.6) expresan que para cada n el número $b^3/3$ está comprendido entre s_n y S_n . Pero ahora es fácil probar que $b^3/3$ es el *único* número que goza de esta propiedad; es decir, que si A es un número que verifica las desigualdades

$$(I.7) \quad s_n < A < S_n$$

para cada entero positivo n , ha de ser necesariamente $A = b^3/3$. Por esta razón dedujo Arquímedes que el área del segmento parabólico es $b^3/3$.

Para probar que $A = b^3/3$ se utilizan una vez más las desigualdades (I.5). Sumando n^2 a los dos miembros de la desigualdad de la izquierda en (I.5) se obtiene:

$$1^2 + 2^2 + \cdots + n^2 < \frac{n^3}{3} + n^2.$$

Multiplicando por b^3/n^3 y utilizando (I.1) se tiene

$$(I.8) \quad S_n < \frac{b^3}{3} + \frac{b^3}{n}.$$

Análogamente, restando n^2 de los dos miembros de la desigualdad de la derecha en (I.5) y multiplicando por b^3/n^3 se llega a la desigualdad:

$$(I.9) \quad \frac{b^3}{3} - \frac{b^3}{n} < s_n.$$

Por tanto, cada número A que satisfaga (I.7) ha de satisfacer también:

$$(I.10) \quad \frac{b^3}{3} - \frac{b^3}{n} < A < \frac{b^3}{3} + \frac{b^3}{n}$$

para cada entero $n \geq 1$. Ahora bien, hay sólo tres posibilidades:

$$A > \frac{b^3}{3}, \quad A < \frac{b^3}{3}, \quad A = \frac{b^3}{3}.$$