



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

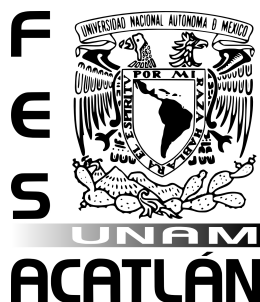
---

Facultad de Estudios Superiores Acatlán

## TERCER EXAMEN PARCIAL

Licenciatura en  
Matemáticas Aplicadas y Computación

**Asignatura:** Cálculo III  
**Profesor:** Saavedra Luis Héctor Axel



**Grupo:** 1302

20 de noviembre de 2024

### Ejercicio 1

Suggest a substitution/transformation that will simplify the following integrands, and find their Jacobians.

(a)  $\iint_R (3x + 2y) \sin(x - y) \, dA$

(b)  $\iint_R e^{(-4x+7y)} \cos(7x - 2y) \, dA$

**Solución.**

### Identificar la Transformación para la Parte (a)

Para la parte (a), observamos el término  $3x + 2y$  junto con  $\sin(x - y)$ . Una sustitución útil aquí es establecer  $u = x - y$  y  $v = 3x + 2y$ . Esta transformación se basa en la estructura de los términos para simplificar el integrando.

### Calcular el Jacobiano para la Parte (a)

Para encontrar el Jacobiano de la transformación  $u = x - y$  y  $v = 3x + 2y$ , planteamos las ecuaciones:

$$x = \frac{1}{5}(2u + v) \quad y \quad y = \frac{1}{5}(3x - v).$$

Luego, calculamos el determinante de la matriz Jacobiana:

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{vmatrix}$$

Esto resulta en:

$$J = \begin{vmatrix} \frac{2}{5} & \frac{1}{5} \\ -\frac{3}{5} & \frac{1}{5} \end{vmatrix} = \frac{1}{5}.$$

Por lo tanto, el Jacobiano es  $\frac{1}{5}$ .

## Identificar la Transformación para la Parte (b)

Para la parte (b), observamos el término exponencial  $e^{-4x+7y}$  y el término trigonométrico  $\cos(7x-2y)$ . Aquí, establecemos  $u = -4x + 7y$  y  $v = 7x - 2y$ , con el objetivo de simplificar el integrando.

## Calcular el Jacobiano para la Parte (b)

Para calcular el Jacobiano, expresamos  $x$  e  $y$  en términos de  $u$  y  $v$ . Las ecuaciones son:

$$x = \frac{v + 2u}{30}, \quad y = \frac{7v + 4u}{30}.$$

El Jacobiano es:

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{vmatrix}.$$

Esto resulta en:

$$J = \begin{vmatrix} \frac{2}{30} & \frac{1}{30} \\ \frac{4}{30} & \frac{7}{30} \end{vmatrix} = \frac{10}{900} = \frac{1}{90}.$$

Por lo tanto, el Jacobiano es  $\frac{1}{90}$ .

### Ejercicio 2

Suggest a substitution/transformation that will simplify the following integrands, and find their Jacobians.

1.  $\iint_R (5x + y)^3 (x + 9y)^4 dA$
2.  $\iint_R x \sin(6x + 7y) - 3y \sin(6x + 7y) dA$

**Solución.**

**Parte (a)**

$$\iint_R (5x + y)^3 (x + 9y)^4 dA$$

### Identificar la Transformación

Observamos que los términos  $5x + y$  y  $x + 9y$  se pueden simplificar utilizando la transformación:

$$u = 5x + y, \quad v = x + 9y.$$

### Resolver $x$ y $y$ en términos de $u$ y $v$

De las ecuaciones de transformación, resolvemos para  $x$  y  $y$ : Para calcular el Jacobiano, necesitamos escribir  $x$  y  $y$  en términos de  $u$  y  $v$ :

$$u = 5x + y \quad \text{y} \quad v = x + 9y.$$

Este sistema se resuelve como sigue:

1. Multiplicamos la primera ecuación por 9:

$$9u = 45x + 9y.$$

2. Restamos la segunda ecuación:

$$9u - v = 45x + 9y - x - 9y,$$

lo que simplifica a:

$$9u - v = 44x \quad \implies \quad x = \frac{9u - v}{44}.$$

3. Usamos la primera ecuación para encontrar  $y$ :

$$y = u - 5x = u - 5 \left( \frac{9u - v}{44} \right) = \frac{44u - 45u + 5v}{44} = \frac{-u + 5v}{44}.$$

Por lo tanto:

$$x = \frac{9u - v}{44}, \quad y = \frac{-u + 5v}{44}.$$

### Calcular el Jacobiano

El Jacobiano  $J$  se define como:

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{vmatrix}.$$

Calculamos las derivadas parciales:

$$\frac{\partial x}{\partial u} = \frac{9}{44}, \quad \frac{\partial x}{\partial v} = -\frac{1}{44}, \quad \frac{\partial y}{\partial u} = -\frac{1}{44}, \quad \frac{\partial y}{\partial v} = \frac{5}{44}.$$

Sustituyendo, obtenemos:

$$J = \begin{vmatrix} \frac{9}{44} & -\frac{1}{44} \\ -\frac{1}{44} & \frac{5}{44} \end{vmatrix} = \frac{9}{44} \cdot \frac{5}{44} - \left( -\frac{1}{44} \cdot -\frac{1}{44} \right) = \frac{45}{1936} - \frac{1}{1936} = \frac{1}{44}.$$

Por lo tanto, el Jacobiano es:

$$\boxed{\frac{1}{44}}$$

## Parte (b)

$$\iint_R x \sin(6x + 7y) - 3y \sin(6x + 7y) dA$$

### Identificar la Transformación

Observamos que  $6x + 7y$  aparece repetido en el integrando. Usamos la transformación:

$$u = 6x + 7y, \quad v = x.$$

### Resolver $x$ y $y$ en términos de $u$ y $v$

De las ecuaciones de transformación, resolvemos para  $x$  y  $y$ :

$$x = v, \quad y = \frac{u - 6v}{7}.$$

### Calcular el Jacobiano

El Jacobiano  $J$  se define como:

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{vmatrix}.$$

Calculamos las derivadas parciales:

$$\frac{\partial x}{\partial u} = 0, \quad \frac{\partial x}{\partial v} = 1, \quad \frac{\partial y}{\partial u} = \frac{1}{7}, \quad \frac{\partial y}{\partial v} = -\frac{6}{7}.$$

Sustituyendo, obtenemos:

$$J = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{7} & -\frac{6}{7} \end{vmatrix} = (0)\left(-\frac{6}{7}\right) - (1)\left(\frac{1}{7}\right) = -\frac{1}{7}.$$

Por lo tanto, el Jacobiano es:

$$\boxed{-\frac{1}{7}}$$

### Ejercicio 3

Sea la región  $D$  el disco unitario:  $x^2 + y^2 \leq 1$ . Evalua la integral:

$$\iint_D \exp(x^2 + y^2) dx dy$$

Haciendo el cambio de variable a coordenadas polares.

### Solución.

La formula para cambiar a coordenadas polares es la siguiente:

$$x = r \cos(\theta) \quad y = r \sin(\theta)$$

Calculamos el Jacobiano:

$$J = \det \begin{pmatrix} \frac{dx}{dr} & \frac{dx}{d\theta} \\ \frac{dy}{dr} & \frac{dy}{d\theta} \end{pmatrix}$$

$$J = \det \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -r \sin(\theta) \\ \sin(\theta) & r \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

$$\iff$$

$$J = r \cos^2(\theta) + r \sin^2(\theta)$$

$$\iff$$

$$J = r(\sin^2(\theta) + \cos^2(\theta))$$

$$\iff$$

$$J = r$$

Ahora cambiamos los indices de integración, al ser un disco, podemos usar la siguiente formula:

$$0 \leq \theta \leq 2\pi$$

$$0 \leq r \leq \text{radio} \iff 0 \leq r \leq 1$$

Por lo que la integral se vería así:

$$\iint_{D^*} r f(r \cos \theta, r \sin(\theta)) dr d\theta$$

$$\begin{aligned}
&= \\
&\int_0^{2\pi} \int_0^1 r e^{r^2 \cos^2(\theta) + r^2 \sin^2(\theta)} dr d\theta \\
&\iff \\
&\int_0^{2\pi} \int_0^1 r e^{r^2 (\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta))} dr d\theta \\
&\iff \\
&\int_0^{2\pi} \int_0^1 r e^{r^2} dr d\theta
\end{aligned}$$

Ya podemos comenzar a integrar:

$$\begin{aligned}
&\int_0^{2\pi} \int_0^1 r e^{r^2} dr d\theta \\
&u = r^2, \quad \frac{du}{2} = r dr \\
&\int_0^{2\pi} \int_{\frac{1}{2}}^1 e^u du d\theta = \int_0^{2\pi} \left. \frac{1}{2} e^{r^2} \right|_0^1 d\theta = \int_0^{2\pi} \frac{e}{2} - \frac{1}{2} d\theta = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (e - 1) d\theta
\end{aligned}$$

Que ya es una integral directa:

$$\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (e - 1) d\theta = \frac{1}{2} [e\theta - \theta]_0^{2\pi} = \frac{2\pi e - 2\pi}{2} = \frac{2\pi(e - 1)}{2} = \pi(e - 1)$$

El resultado es:  $\pi(e - 1)$

#### Ejercicio 4

Sea  $D$  la región dada por  $0 \leq y \leq x$  y  $0 \leq x \leq 1$ , Evalua la integral:

$$\iint_D (x + y) dy dx$$

Haciendo el cambio de variable:  $x = u + v$  y  $y = u - v$ , verifica la respuesta evaluando la integral de forma directa.

**Solución.**

Primero vamos a calcular el Jacobiano:

$$J = \det\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = |(-1) - (1)| = 2$$

El jacobiano va a multiplicar la función a integrar.

Ahora vamos a ver los nuevos índices, podemos usar desigualdades tal que:

1.  $0 \leq y \iff 0 \leq u - v \iff v \leq u$
2.  $y \leq x \iff u - v \leq u + v \iff -2v \leq 0 \iff 0 \leq v$
3.  $x \leq 1 \iff u + v \leq 1 \iff u \leq 1 - v$
4. De 1 y 3:  $v \leq u \leq 1 - v \iff v \leq 1 - v \iff v \leq \frac{1}{2}$  De 2:  $0 \leq v \leq \frac{1}{2}$
5. De 1 y 3:  $v \leq u \leq 1 - v$

Ahora podemos plantear la nueva integral:

$$\int_0^{\frac{1}{2}} \int_v^{1-v} 2(u+v) + (u-v) \, dudv = \int_0^{\frac{1}{2}} \int_v^{1-v} 4u \, dudv$$

Resolviendo:

$$\begin{aligned} \int_0^{\frac{1}{2}} \int_v^{1-v} 4u \, dudv &= \int_0^{\frac{1}{2}} 2u^2 \Big|_v^{1-v} dv = \int_0^{\frac{1}{2}} 2(-2v+1)dv = \int_0^{\frac{1}{2}} -4v+2 \, dv = -4\left(\frac{v^2}{2}\right) + 2v \\ &= -2v^2 + 2v \Big|_0^{\frac{1}{2}} = -2\left(\frac{1}{4}\right) + 2\left(\frac{1}{2}\right) = -\frac{1}{2} + 1 = \frac{1}{2} \end{aligned}$$

**COMPROBACIÓN**

$$\begin{aligned} \int_0^1 \int_0^x (x+y) \, dy \, dx &= \int_0^1 xy + \frac{y^2}{2} \Big|_0^x dx = \int_0^1 x^2 + \frac{x^2}{2} \, dx = \frac{x^3}{3} + \frac{x^3}{6} \Big|_0^1 \\ &= \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{1}{2} \end{aligned}$$



### Ejercicio 5

Let  $T(u, v) = (x(u, v), y(u, v))$  be the mapping defined by:

$$T(u, v) = (4u, 2u + 3v)$$

Let the rectangle  $[0, 1] \times [1, 2]$ . Find  $D = T(D^*)$  and evaluate:

(a)  $\iint_D xy \, dx \, dy$

(b)  $\iint_D (x - y) \, dx \, dy$

### Solución.

El dominio  $D^*$  está definido por:

$$0 \leq u \leq 1 \quad 1 \leq v \leq 2$$

Utilizamos los términos de la transformación  $T$  para obtener los límites de  $D$ :

Para  $x$ :

$x = 4u$ , como  $u$  varía de 0 a 1:

$$0 \leq x \leq 4$$

Para  $y$ :

$y = 2u + 3v$ , cuando  $v = 1$ , entonces:  $y = 2u + 3$ , cuando  $v = 2$ , entonces:  $y = 2u + 6$

Sustituimos  $u = \frac{x}{4}$  y acotamos:

$$\frac{x}{4} + 3 \leq y \leq \frac{x}{4} + 6$$

entonces:  $D : 0 \leq x \leq 4 \quad \frac{x}{4} + 3 \leq y \leq \frac{x}{4} + 6$

Procedemos a calcular la matriz Jacobiana de la transformación:

$$J = \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{vmatrix}$$

$$J = \begin{vmatrix} 4 & 0 \\ 2 & 3 \end{vmatrix} = (4)(3) - (0)(2) = 12$$

Por lo tanto:

$$dx dy = |J| \, du dv = 12 du dv$$

Evaluamos la primer integral:

$$\begin{aligned}
 \iint_D xy \, dx \, dy &= \iint_{D^*} (8u^2 + 12uv) \cdot 12 \, dudv \\
 &= \int_0^1 \int_1^2 (96u^2 + 144uv) \, dv \, du \\
 &= \int_0^1 \left( 96u^2v + 144u \cdot \frac{v^2}{2} \right) \Big|_1^2 \, du \\
 &= \int_0^1 ((192u^2 + 288u) - (96u^2 + 72u)) \, du \\
 &= \int_0^1 (96u^2 + 216u) \, du \\
 &= \left( \frac{96u^3}{3} + \frac{216u^2}{2} \right) \Big|_0^1 \\
 &= \left( \frac{96}{3} + \frac{216}{2} \right) - \left( \frac{0}{3} + \frac{0}{2} \right) \\
 &= (32 + 108) = 140
 \end{aligned}$$

Evaluamos la segunda integral:

$$\begin{aligned}
 \iint_D (x - y) \, dx \, dy &= \iint_{D^*} (2u - 3v) \cdot 12 \, dudv \\
 &= \int_0^1 \int_1^2 (24u - 36v) \, dv \, du \\
 &= \int_0^1 \left( 24uv - 36 \cdot \frac{v^2}{2} \right) \Big|_1^2 \, du \\
 &= \int_0^1 ((48u - 72) - (24u - 18)) \, du \\
 &= \int_0^1 (24u - 54) \, du \\
 &= \left( \frac{24u^2}{2} - 54u \right) \Big|_0^1 \\
 &= (12 - 54) - (0 - 0) = -42
 \end{aligned}$$

### Ejercicio 6

Repeat Exercise 5 for  $T(u, v) = (u, v(1 + u))$

**Solución.**

El dominio  $D^*$  está definido por:

$$0 \leq u \leq 1 \quad 1 \leq v \leq 2$$

Utilizamos los términos de la transformación  $T$  para obtener los límites de  $D$ :

Para  $x$ :

$x = u$ , como  $u$  varía de 0 a 1:

$$0 \leq x \leq 1$$

Para  $y$ :

$y = v(1 + u)$ , cuando  $v = 1$ , entonces:  $y = 1 + x$ , cuando  $v = 2$ , entonces:  $y = 2 + 2x$

$$1 + x \leq y \leq 2 + 2x$$

entonces:  $D : 0 \leq x \leq 1 \quad 1 + x \leq y \leq 2 + 2x$

Calculamos la matriz Jacobiana de la transformación:

$$J = \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{vmatrix}$$

$$J = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ v & 1 + u \end{vmatrix} = (1)(1 + u) - (0)(v) = 1 + u$$

Por lo tanto:

$$dxdy = |J| dudv = (1 + u)dudv$$

Evaluamos la primer integral:

$$\begin{aligned} \iint_D xy \, dx \, dy &= \iint_{D^*} uv(1 + u) \cdot (1 + u)dudv \\ &= \int_0^1 \int_1^2 uv(1 + u)^2 dv du \\ &= \int_0^1 \left( u(1 + u)^2 \cdot \frac{v^2}{2} \right) \Big|_1^2 du \\ &= \int_0^1 \left( (2u(1 + u)^2) - \left( \frac{u(1 + u)^2}{2} \right) \right) du \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \int_0^1 \left( \frac{3u^3 + 6u^2 + 3u}{2} \right) du \\
&= \frac{3}{2} \cdot \int_0^1 (u^3 + 2u^2 + u) du \\
&= \frac{3}{2} \cdot \left( \frac{u^4}{4} + \frac{2u^3}{3} + \frac{u^2}{2} \right) \Big|_0^1 \\
&= \frac{3}{2} \cdot \frac{17}{12} - \frac{3}{2} \cdot 0 \\
&= \frac{3}{2} \cdot \frac{17}{12} = \frac{17}{8}
\end{aligned}$$

Evaluamos la segunda integral:

$$\begin{aligned}
\iint_D (x - y) \, dx \, dy &= \iint_{D^*} (u - v - uv) \cdot (1 + u) \, du \, dv \\
&= \int_0^1 \int_1^2 (u + u^2 - v - 2uv - u^2v) \, dv \, du \\
&= \int_0^1 \left( uv + u^2v - \frac{v^2}{2} - uv^2 - \frac{u^2v^2}{2} \right) \Big|_1^2 \, du \\
&= \int_0^1 (2u + 2u^2 - 2 - 4u - 2u^2) - \left( u + u^2 - \frac{1}{2} - u - \frac{u^2}{2} \right) \, du \\
&= \int_0^1 \left( \frac{-u^2}{2} - 2u - \frac{3}{2} \right) \, du \\
&= \frac{-1}{2} \cdot \int_0^1 (u^2 + 4u + 3) \, du \\
&= \frac{-1}{2} \cdot \left( \frac{u^3}{3} + 2u^2 + 3u \right) \Big|_0^1 \\
&= \frac{-1}{2} \cdot \frac{16}{3} - \frac{-1}{2} \cdot 0 \\
&= \frac{-1}{2} \cdot \frac{16}{3} = \frac{-8}{3}
\end{aligned}$$

### Ejercicio 7

Evaluate

$$\iint_D \frac{dx \, dy}{\sqrt{1 + x + 2y}},$$

where  $D = [0, 1] \times [0, 1]$ , by setting  $T(u, v) = (u, \frac{v}{2})$  and evaluating an integral over  $D^*$ , where  $T(D^*) = D$ .

**Solución.**

Como  $T(u, v) = (u, v/2)$  en  $T(D^*) = D$ , la transformación  $T$  es  $x = u$  y  $y = v/2$ .

La transformación  $T$  está dada por el determinante  $\neq 0$ . El primer paso es encontrar el determinante Jacobiano de  $T$  para el cambio de variable.

El determinante Jacobiano de  $T$  es:

$$\frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{vmatrix}.$$

Dado que  $x = u$  y  $y = v/2$ ,

$$J = \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/2 \end{vmatrix}.$$

$$\text{Det} = (1)(1/2) - (0)(0) = 1/2 - 0 = 1/2.$$

El área de  $D = T(D^*)$  se obtiene integrando el valor absoluto del Jacobiano:

$$A(D) = \iint_D dx \, dy = \iint_{D^*} \left| \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} \right| du \, dv.$$

Como  $\text{Det} = 1/2$ :

- Para  $x$ : Como  $u = x$ , los límites de  $x \in [0, 1]$  se convierten en  $u \in [0, 1]$ . - Para  $y$ : Como  $v = 2y$ , si  $y \in [0, 1]$  entonces  $v \in [2(0), 2(1)] = [0, 2]$ .

La integral:

$$\iint_D \frac{dx \, dy}{\sqrt{1+x+2y}}, \quad D = [0, 1] \times [0, 1],$$

se expresa en términos de  $u, v$ :

$$\int_0^2 \int_0^1 \frac{du \, dv}{\sqrt{1+u+v}} \cdot \frac{1}{2}.$$

Resolviendo la integral respecto a  $u$ :

$$\frac{1}{2} \int_0^2 \int_0^1 \frac{du \, dv}{\sqrt{1+u+v}}.$$

Sea  $w = 1 + v + u$ , entonces  $dw = du$ ,

$$\int \frac{1}{w^{1/2}} dw = \int w^{-1/2} dw = 2w^{1/2} + C.$$

$$\frac{1}{2} \int_0^2 \left[ 2\sqrt{1+v+u} \right]_0^1 dv =$$

$$\frac{1}{2}(2) \int_0^2 \left[ \sqrt{1+v+1} - \sqrt{1+v+0} \right] dv =$$

$$\int_0^2 \left[ \sqrt{2+v} - \sqrt{1+v} \right] dv.$$

Resolviendo la integral respecto a  $v$ :

Sea  $w = v + 2$ ,  $dw = dv$ , y  $z = v + 1$ ,  $dz = dv$ ,

$$\int w^{1/2} dw = \frac{2w^{3/2}}{3} + C, \quad \int z^{1/2} dz = \frac{2z^{3/2}}{3} + C.$$

Finalmente:

$$\left[ \frac{2(v+2)^{3/2}}{3} - \frac{2(v+1)^{3/2}}{3} \right]_0^2 =$$

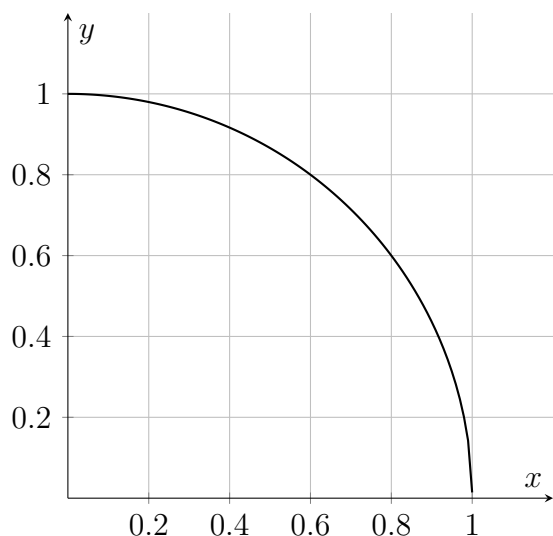
$$\frac{(16 - 2\sqrt{8})}{3} - \frac{(2\sqrt{3} - 2)}{3} \approx 0.6502803018.$$

### Ejercicio 8

**8. Define**  $T(u, v) = (u^2 - v^2, 2uv)$ . Let  $D^*$  be the set of  $(u, v)$  with  $u^2 + v^2 \leq 1$ ,  $u \geq 0$ ,  $v \geq 0$ . Find  $T(D^*) = D$ . Evaluate  $\iint_D dx dy$ .

Solución.

## Transformación y Jacobiano



El límite de  $D^*$  está dado por  $u = 0$ ,  $v = 0$ ,  $u^2 + v^2 = 1$ , con las transformaciones:

$$x = u^2 - v^2, \quad y = 2uv$$

Por el Jacobiano directo, tenemos:

$$\frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{vmatrix}$$

Calculando las derivadas parciales:

$$\frac{\partial x}{\partial u} = 2u, \quad \frac{\partial x}{\partial v} = -2v, \quad \frac{\partial y}{\partial u} = 2v, \quad \frac{\partial y}{\partial v} = 2u$$

El Jacobiano es:

$$J = \begin{vmatrix} 2u & -2v \\ 2v & 2u \end{vmatrix} = 4u^2 + 4v^2 = 4(u^2 + v^2)$$

Como la región  $D^*$  está definida por  $D^* = \{(u, v) | u^2 + v^2 \leq 1, u \geq 0, v \geq 0\}$ , el diferencial en  $(x, y)$  es:

$$dx \, dy = |4(u^2 + v^2)| \, du \, dv = 4(u^2 + v^2) \, du \, dv$$

La integral sobre la región  $D^*$  en  $(u, v)$  es:

$$\iint_D dx \, dy = \iint_{D^*} 4(u^2 + v^2) \, du \, dv$$

Los límites de integración para  $u$  van de 0 a 1, y  $v$  va de 0 a  $\sqrt{1 - u^2}$ . Por lo tanto, la integral es:

$$\int_0^1 4 \int_0^{\sqrt{1-u^2}} (u^2 + v^2) \, dv \, du$$

La integral en coordenadas cartesianas es:

$$I = \int_0^1 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} 4(x^2 + y^2) dy dx$$

Esto corresponde al cuarto de círculo en el primer cuadrante con  $x^2 + y^2 \leq 1$ .

## Resolver la integral interior

La integral interior es:

$$\begin{aligned} \int_0^{\sqrt{1-x^2}} 4(x^2 + y^2) dy \\ \int_0^{\sqrt{1-x^2}} 4(x^2 + y^2) dy = 4 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} x^2 dy + 4 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} y^2 dy \end{aligned}$$

**Primera parte:**  $4 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} x^2 dy$

Dado que  $x^2$  es constante respecto a  $y$ , esta integral es:

$$4 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} x^2 dy = 4x^2 [y]_0^{\sqrt{1-x^2}} = 4x^2(\sqrt{1-x^2})$$

**Segunda parte:**  $4 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} y^2 dy$

La integral de  $y^2$  con respecto a  $y$  es:

$$4 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} y^2 dy = 4 \left[ \frac{y^3}{3} \right]_0^{\sqrt{1-x^2}} = 4 \cdot \frac{1}{3} ((1-x^2)^{3/2})$$

Entonces:

$$\int_0^{\sqrt{1-x^2}} 4(x^2 + y^2) dy = 4x^2(\sqrt{1-x^2}) + \frac{4}{3}(1-x^2)^{3/2}$$

## Resolver la integral exterior

Con respecto a  $x$ , la integral es:

$$I = \int_0^1 \left[ 4x^2(\sqrt{1-x^2}) + \frac{4}{3}(1-x^2)^{3/2} \right] dx$$

Dividiendo en dos integrales separadas:

$$I = \int_0^1 4x^2(\sqrt{1-x^2}) dx + \int_0^1 \frac{4}{3}(1-x^2)^{3/2} dx$$



**Primera integral:**  $4x^2(\sqrt{1-x^2})$ 

Usamos el cambio de variable  $u = 1 - x^2$ , con  $du = -2x dx$ . Los límites cambian: - Cuando  $x = 0$ ,  $u = 1$  - Cuando  $x = 1$ ,  $u = 0$

$$\int_0^1 4x^2(\sqrt{1-x^2}) dx = \int_1^0 4u^{1/2} \left(-\frac{1}{2} du\right) = \int_0^1 2u^{1/2} du$$

$$\int_0^1 2u^{1/2} du = 2 \cdot \frac{2}{3} u^{3/2} \Big|_0^1 = \frac{4}{3}$$

**Segunda integral:**  $\frac{4}{3}(1-x^2)^{3/2}$ 

Usamos el mismo cambio de variable  $u = 1 - x^2$ :

$$\int_0^1 \frac{4}{3}(1-x^2)^{3/2} dx = \frac{4}{3} \int_1^0 u^{3/2} \left(-\frac{1}{2} du\right) = \frac{2}{3} \int_0^1 u^{3/2} du$$

Resolviendo:

$$\frac{2}{3} \int_0^1 u^{3/2} du = \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{5} u^{5/2} \Big|_0^1 = \frac{4}{15}$$

**Resultado**

Sumando ambas integrales:

$$I = \frac{4}{3} + \frac{4}{15} = \frac{20}{15} + \frac{4}{15} = \frac{24}{15} = \frac{8}{5}$$

## Cálculo de la Integral con Coordenadas Polares

La integral es:

$$\int_0^1 4 \int_0^{\sqrt{1-u^2}} (u^2 + v^2) dv du$$

Puede resolverse usando coordenadas polares, donde las transformaciones son:

$$u = r \cos \theta, \quad v = r \sin \theta$$

Aquí,  $r$  es el radio y  $\theta$  es el ángulo. Dado que estamos trabajando en el primer cuadrante, tenemos:

$$r \text{ va de } 0 \text{ a } 1, \quad \theta \text{ va de } 0 \text{ a } \frac{\pi}{2}$$

La integral en coordenadas polares se convierte en:

$$\iint_D 4(u^2 + v^2) du dv = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^1 4r^2 \cdot r dr d\theta$$

Ahora, calculamos el Jacobiano de la transformación:

$$\frac{\partial(x, y)}{\partial(r, \theta)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial x}{\partial \theta} \\ \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial \theta} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \theta & -r \sin \theta \\ \sin \theta & r \cos \theta \end{vmatrix} = r(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) = r$$

Por lo tanto, la integral se convierte en:

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^1 4r^3 dr d\theta$$

Separando las integrales:

$$\begin{aligned} & \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \left( \int_0^1 4r^3 dr \right) \\ & \int_0^1 4r^3 dr = \left[ \frac{4r^4}{4} \right]_0^1 = [r^4]_0^1 = 1^4 - 0 = 1 \\ & \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta = \frac{\pi}{2} \end{aligned}$$

Por lo tanto, al multiplicar las integrales:

$$\frac{\pi}{2}$$

### Ejercicio 9

Let  $T(u, v)$  be as in Exercise 8. By making a change of variables, “formally” evaluate the “improper” integral

$$(a) \iint_D \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} dx dy,$$

**Solución.**

$$\iint_D \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} dx dy,$$

$$T(u, v) = (u^2 - v^2, 2uv)$$

**Transformación de variables**

$$x = u^2 - v^2, \quad y = 2uv$$

$$x^2 + y^2 = (u^2 - v^2)^2 + (2uv)^2$$

$$x^2 + y^2 = u^4 - 2u^2v^2 + v^4 + 4u^2v^2 = u^4 + 2u^2v^2 + v^4 = (u^2 + v^2)^2$$

Por lo tanto:

$$\sqrt{x^2 + y^2} = u^2 + v^2$$

**Determinante jacobiano**

$$\frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} = \begin{vmatrix} 2u & -2v \\ 2v & 2u \end{vmatrix} = (2u)(2u) - (-2v)(2v) = 4u^2 + 4v^2 = 4(u^2 + v^2)$$

$$\left| \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} \right| = 4(u^2 + v^2)$$

**Integral en las nuevas variables**

$$\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{1}{u^2 + v^2}$$

$$dx dy = 4(u^2 + v^2) du dv.$$

Por lo tanto:

$$\iint \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} dx dy = \iint \frac{1}{u^2 + v^2} \cdot 4(u^2 + v^2) du dv.$$

$$\iint \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} dx dy = \iint 4 du dv.$$

## Región de integración

La region de integracion del conjunto  $D^*$ , que es un cuarto de disco en el plano  $(u, v)$ , donde:

$$u^2 + v^2 \leq 1, \quad u \geq 0, \quad v \geq 0.$$

## Integral final en coordenadas polares

$u^2 + v^2 = r^2$ , - La región es:  $0 \leq r \leq 1$ ,  $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^1 4r \, dr \, d\theta.$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^1 4r \, dr \, d\theta = \int_0^{\frac{\pi}{2}} [2r^2]_0^1 d\theta = \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2 \, d\theta = 2\theta \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = 2 \cdot \frac{\pi}{2} = \pi.$$

$$\iint \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \, dx \, dy = \pi.$$

### Ejercicio 10

Calculate where  $R$  is the region bounded by  $x = 0$ ,  $y = 0$ ,  $x + y = 1$ ,  $x + y = 4$ , by using the mapping  $T(u, v) = (u - uv, uv)$ .

(a)  $\iint_R \frac{1}{x + y} \, dy \, dx$

**Solución.**

$$\int \int_R \frac{1}{x + y} \, dy \, dx$$

$$T(u, v) = (u - uv, uv).$$

## Transformación de variables

$$x = u - uv, \quad y = uv.$$

## Determinante Jacobiano

$$\frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} = \begin{vmatrix} 1-v & -u \\ v & u \end{vmatrix} = (1-v)u - (-uv) = u - uv + uv = u.$$

$$\left| \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} \right| = u.$$

## Region de integracion

- $x = 0 \implies u - uv = 0 \implies u(1 - v) = 0 \implies u = 0 \text{ o } v = 1,$
- $y = 0 \implies uv = 0 \implies v = 0$  (cuando  $u \neq 0$ ),
- $x + y = 1 \implies (u - uv) + uv = 1 \implies u = 1,$
- $x + y = 4 \implies (u - uv) + uv = 4 \implies u = 4.$

$$1 \leq u \leq 4, \quad 0 \leq v \leq 1.$$

## Integral final

$$\int \int_R \frac{1}{x+y} dy dx.$$

$$x + y = u, \quad dy dx = u du dv.$$

$$\int_1^4 \int_0^1 \frac{1}{u} \cdot u dv du = \int_1^4 \int_0^1 1 dv du = \int_1^4 [v]_0^1 du = \int_1^4 1 du = \int_1^4 1 du = 4 - 1 = 3$$

$$\int \int_R \frac{1}{x+y} dy dx = 3.$$

### Ejercicio 11

Evaluate  $\iint_D (x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}} dx dy$  where D is the disk  $x^2 + y^2 \leq 4$

### Solución.

Tenemos que  $dx dy = dA$

Ahora bien, si  $x^2 + y^2 \leq 4$

$$x = \sqrt{4 - y^2} = \sqrt{4}$$

$$\begin{aligned}
x &= \pm 2 \\
0 &\leq x \leq 2 \\
y &= \sqrt{4 - x^2} = \sqrt{4} \\
y &= \pm 2 \\
0 &\leq y \leq 2
\end{aligned}$$

Aplicamos coordenadas polares:

$$\begin{aligned}
x^2 + y^2 &= r^2 \\
x^2 + y^2 &\leq 4 \\
r^2 &= 4 \\
r &= \sqrt{4} \\
r &= 2
\end{aligned}$$

Las funciones de movimiento de 0 a  $2\pi$  son un disco, entonces:

$$\begin{aligned}
dxdy &= dA = r dr d\theta \\
&\int_0^2 \int_0^{2\pi} (r^2)^{\frac{3}{2}} r d\theta dr \\
&= \int_0^2 \int_0^{2\pi} r^3 r d\theta dr = \int_0^2 \int_0^{2\pi} r^4 d\theta dr \\
&= \int_0^2 r^4 \int_0^{2\pi} d\theta dr = \int_0^2 r^4(\theta) \Big|_0^{2\pi} dr \\
&= \int_0^2 r^4 \cdot (2\pi) dr \\
&= (2\pi) \cdot \int_0^2 r^4 = (2\pi) \cdot \frac{r^5}{5} \Big|_0^2 \\
&= (2\pi) \cdot \frac{2^5}{5} = 2\pi \cdot \frac{32}{5} = \frac{64\pi}{5}
\end{aligned}$$

### Ejercicio 12

Let  $D^*$  be a  $v$ -simple region in the  $uv$  plane bounded by  $v = g(u)$  and  $v = h(u) \leq g(u)$  for  $a \leq u \leq b$ . Let  $T : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  be the transformation given by  $x = u$  and  $y = \psi(u, v)$  where  $\psi$  is of class  $C^{-1}$  and  $\partial\psi/\partial v$  is never zero. Assume that  $T(D^*) = D$  is a  $y$ -simple region; show that if  $f : D \rightarrow \mathbb{R}$  is continuous, then

$$\iint_D f(xy) \, dx \, dy = \iint_{D^*} f(u, \psi(u, v)) \left| \frac{\partial\psi}{\partial v} \right| \, dudv$$

**Solución.**

Queremos demostrar que:

$$\iint_D f(x, y) \, dx \, dy = \iint_{D^*} f(u, \psi(u, v)) \left| \frac{\partial \psi}{\partial v} \right| \, du \, dv$$

Si tenemos que  $x = u$  y  $y = \psi(u, v)$

Entonces:

$$dx dy = \left| \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} \right| du dv$$

en donde  $\frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)}$  es el Jacobiano de la transformación  $T$ .

Si calculamos el Jacobiano:

$$J_T = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\partial \psi}{\partial u} & \frac{\partial \psi}{\partial v} \end{bmatrix}$$

Así, el determinante de la matriz es:

$$|J_T| = \left| \frac{\partial \psi}{\partial v} \right|$$

Observación:

Como en  $D^*$ ,  $v$  está acotada por  $g(u) \leq v \leq h(u)$  y a su vez,  $u$  por  $a \leq u \leq b$ .

Entonces la transformación  $T$  mapea la región en el plano  $uv$  al dominio  $D$  en el plano  $xy$ , manteniendo así la correspondencia uno a uno, ya que teníamos que  $\frac{\partial \psi}{\partial v} \neq 0$ .

Así, dado que  $\psi$  es de  $C^{-1}$ ,  $\frac{\partial \psi}{\partial v} \neq 0$  y  $f$  es continua, el cambio de variables es completamente válido y la ecuación dada al inicio se cumple.

$$\iint_D f(x, y) \, dx \, dy = \iint_{D^*} f(u, \psi(u, v)) \left| \frac{\partial \psi}{\partial v} \right| \, du \, dv \quad \blacksquare$$

**Ejercicio 13**

**Solución.**

**Ejercicio 14**

**Solución.**

**Ejercicio 15**

Integrate  $ze^{x^2+y^2}$  over the cylinder  $x^2 + y^2 \leq 4, 2 \leq z \leq 3$ .

**Solución.**

Trabajando con coordenadas cilíndricas tenemos que

$$\begin{aligned}x &= r \cos \theta, \\y &= r \sin \theta, \\z &= z, \\0 < r &\leq 2, 0 \leq \theta \leq 2\pi, 2 \leq z \leq 3,\end{aligned}$$

Luego tenemos que

$$\Rightarrow x^2 + y^2 = (r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta)^2 = r^2(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) = r^2$$

Ahora, la matriz de derivadas parciales de cambio de coordenadas, para coordenadas cilíndricas está dada por:

$$\begin{aligned}J &= \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(r, \theta, z)} \\&= \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial x}{\partial \theta} & \frac{\partial x}{\partial z} \\ \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial \theta} & \frac{\partial y}{\partial z} \\ \frac{\partial z}{\partial r} & \frac{\partial z}{\partial \theta} & \frac{\partial z}{\partial z} \end{vmatrix} \\&= \begin{vmatrix} \cos \theta & -r \sin \theta & 0 \\ r \sin \theta & r \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \\&= \begin{vmatrix} \cos \theta & -r \sin \theta \\ r \sin \theta & r \cos \theta \end{vmatrix} \\&= \cos \theta \cdot r \cos \theta + r \sin \theta \cdot \sin \theta \\&= r(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) \\&= r \\ \therefore |J| &= r\end{aligned}$$



Sea  $V$  el cilindro  $x^2 + y^2 \leq 4$ ,  $2 \leq z \leq 3$ . Ahora aplicamos cambio de variable para obtener

$$\int \int \int_V z e^{x^2+y^2} dx dy dz = \int \int \int_{V^*} z e^{r^2} |J| dr d\theta dz$$

$$\text{con } V^* = \{(r, \theta, z) \in \mathbb{R}^3 \mid 0 < r \leq 2, 0 \leq \theta \leq 2\pi, 2 \leq z \leq 3\}.$$

Integramos entonces,

$$\begin{aligned} \int \int \int_{V^*} z e^{r^2} |J| dr d\theta dz &= \int_2^3 \int_0^{2\pi} \int_0^2 z r e^{r^2} dr d\theta dz \\ &= \int_2^3 \int_0^{2\pi} \left[ \int_0^2 z r e^{r^2} dr \right] d\theta dz \\ &= \int_2^3 z \int_0^{2\pi} \left[ \int_0^2 r e^{r^2} dr \right] d\theta dz \\ &= \int_2^3 z dz \cdot \int_0^{2\pi} d\theta \cdot \int_0^2 r e^{r^2} dr \\ &= \frac{z^2}{2} \Big|_2^3 \cdot [\theta]_0^{2\pi} \cdot \int_0^2 r e^{r^2} dr \\ &= \left( \frac{9}{2} - \frac{4}{2} \right) \cdot 2\pi \cdot \int_0^2 r e^{r^2} dr \\ &= \frac{5\pi}{2} \int_0^2 2r e^{r^2} dr \end{aligned}$$

Aplicando la sustitución

$$\begin{aligned} t = r^2 &\Rightarrow dt = 2r dr \\ a = 0 &\Rightarrow 0 \\ b = 2 &\Rightarrow 4 \end{aligned}$$

Continuamos entonces

$$\begin{aligned} &= \frac{5\pi^2}{2} \int_0^4 e^t dt \\ &= \frac{5\pi^2}{2} [e^t]_0^4 \\ &= \frac{5\pi^2}{2} (e^4 - 1) \end{aligned}$$

Por lo que el resultado de la integral es:

$$= \frac{5\pi^2}{2}(e^4 - 1)$$

### Ejercicio 16

Let  $D$  be the unit disk. Express

$$\iint_D (1 + x^2 + y^2)^{3/2} dx dy$$

as an integral over  $[0, 1] \times [0, 2\pi]$  and evaluate.

### Solución.

Usando coordenadas polares para el disco vamos a tener la integral sobre  $[0, 1] \times [0, 2\pi]$ .

La coordenadas polares para el disco unitario serían

$$\begin{aligned}x &= r \cos \theta, \\y &= r \sin \theta, \\x^2 + y^2 &= r^2 \Rightarrow dx dy = r dr d\theta\end{aligned}$$

Los límites de integración quedan como

$$0 < r \leq 1, 0 < \theta \leq 2\pi$$

Y nos queda la integral de la forma

$$\int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^1 (1 + r^2)^{\frac{3}{2}} r dr d\theta$$

Ahora, sustituimos  $1 + r^2 = p^2$  y utilizamos cambio de variable para integrar.

$$\int_0^{2\pi} \int_{p=1}^{\sqrt{2}} (p^2)^{\frac{3}{2}}$$

Cambiando tambien los límites de integración

$$\begin{aligned}r = 0 &\Rightarrow p = \sqrt{1} = 1 \\r = 1 &\Rightarrow p = \sqrt{2}\end{aligned}$$

Desarrollando tenemos que

$$\begin{aligned}
&= \int_0^{2\pi} \int_{p=1}^{\sqrt{2}} p^3 \cdot p \, dp d\theta \\
&= \int_0^{2\pi} \int_{p=1}^{\sqrt{2}} p^4 \, dp d\theta \\
&= \int_0^{2\pi} d\theta \cdot \int_1^{\sqrt{2}} p^4 \, dp \\
&= 2\pi \cdot \int_1^{\sqrt{2}} p^4 \, dp \\
&= 2\pi \cdot \left. \frac{p^5}{5} \right|_1^{\sqrt{2}} \\
&= 2\pi \cdot \frac{1}{5} ((\sqrt{2})^5 - 1^5)
\end{aligned}$$

Así podemos concluir que el resultado es:

$$\boxed{\frac{2\pi}{5}(4\sqrt{2} - 1)}$$

### Ejercicio 17

Usando coordenadas polares, encuentra el área delimitada por la lemniscata:

$$(x^2 + y^2)^2 = 2a^2(x^2 - y^2)$$

**Solución.**

## Cálculo del área de una lemniscata usando coordenadas polares

La ecuación de la lemniscata es:

$$(x^2 + y^2)^2 = 2a^2(x^2 - y^2)$$

### Paso 1: Cambiar a coordenadas polares

En coordenadas polares,  $x = r \cos \theta$  y  $y = r \sin \theta$ , además  $x^2 + y^2 = r^2$ . Sustituimos en la ecuación de la lemniscata:

$$(r^2)^2 = 2a^2(r^2 \cos^2 \theta - r^2 \sin^2 \theta)$$

Esto se simplifica a:

$$r^4 = 2a^2 r^2 (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

Factorizamos  $r^2$  (suponiendo  $r \neq 0$ ):

$$r^2 = 2a^2 (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

Usamos la identidad  $\cos^2 \theta - \sin^2 \theta = \cos(2\theta)$ :

$$r^2 = 2a^2 \cos(2\theta)$$

Por lo tanto:

$$r = \sqrt{2a^2 \cos(2\theta)}$$

## Paso 2: Área en coordenadas polares

La fórmula para el área en coordenadas polares es:

$$A = \frac{1}{2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} r^2 d\theta$$

Sustituimos  $r^2 = 2a^2 \cos(2\theta)$ :

$$A = \frac{1}{2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} 2a^2 \cos(2\theta) d\theta$$

$$A = a^2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos(2\theta) d\theta$$

La lemniscata tiene simetría respecto al origen, por lo que podemos calcular el área de  $(-\frac{\pi}{4}$  a  $\frac{\pi}{4})$  y luego multiplicar por 2:

$$A_{\text{total}} = 2 \cdot a^2 \int_{-\pi/4}^{\pi/4} \cos(2\theta) d\theta$$

## Paso 3: Resolver la integral

Sabemos que  $\int \cos(2\theta) d\theta = \frac{1}{2} \sin(2\theta)$ :

$$A_{\text{total}} = 2 \cdot a^2 \left[ \frac{1}{2} \sin(2\theta) \right]_{-\pi/4}^{\pi/4}$$

Evaluamos los límites:

$$\sin(2\theta) \text{ en } \theta = \frac{\pi}{4} \text{ es } \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1$$

$$\sin(2\theta) \text{ en } \theta = -\frac{\pi}{4} \text{ es } \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) = -1$$

Por lo tanto:

$$A_{\text{total}} = 2 \cdot a^2 \cdot \frac{1}{2} (1 - (-1))$$

$$A_{\text{total}} = 2 \cdot a^2$$

## Respuesta final

El área total delimitada por la lemniscata es:

$$A = 2a^2$$

### Ejercicio 18

Rehaz el Ejercicio 15 de la Sección 5.3 utilizando un cambio de variables y compara el esfuerzo involucrado en cada método.

**Solución.**

## Cálculo del volumen

Queremos encontrar el volumen de la región encerrada por la superficie  $z = x^2 + y^2$  y entre  $z = 0$  y  $z = 10$ .

### Paso 1: Conversión a coordenadas cilíndricas

En coordenadas cilíndricas:

$$x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta, \quad z = z,$$

y la ecuación  $z = x^2 + y^2$  se convierte en:

$$z = r^2,$$

ya que  $x^2 + y^2 = r^2$ .

Los límites son:

$$\blacksquare \quad 0 \leq r \leq \sqrt{10} \text{ (de } z = r^2 \text{ y } z \leq 10),$$

- $0 \leq \theta \leq 2\pi$  (rotación completa alrededor del eje  $z$ ),
- $0 \leq z \leq r^2$ .

El elemento de volumen en coordenadas cilíndricas es:

$$dV = r \, dz \, dr \, d\theta.$$

## Paso 2: Configuración de la integral

El volumen  $V$  está dado por:

$$V = \int_0^{2\pi} \int_0^{\sqrt{10}} \int_0^{r^2} r \, dz \, dr \, d\theta.$$

## Paso 3: Evaluación de la integral

Primero, integramos respecto a  $z$ :

$$\int_0^{r^2} r \, dz = r[z]_0^{r^2} = r(r^2 - 0) = r^3.$$

Sustituyendo en la integral, tenemos:

$$V = \int_0^{2\pi} \int_0^{\sqrt{10}} r^3 \, dr \, d\theta.$$

A continuación, integramos respecto a  $r$ :

$$\int_0^{\sqrt{10}} r^3 \, dr = \left[ \frac{r^4}{4} \right]_0^{\sqrt{10}} = \frac{(\sqrt{10})^4}{4} - \frac{0^4}{4} = \frac{100}{4} = 25.$$

Sustituyendo nuevamente, obtenemos:

$$V = \int_0^{2\pi} 25 \, d\theta.$$

Finalmente, integramos respecto a  $\theta$ :

$$\int_0^{2\pi} 25 \, d\theta = 25[\theta]_0^{2\pi} = 25(2\pi - 0) = 50\pi.$$

## Respuesta final

El volumen de la región es:

$$\boxed{50\pi}.$$

### Ejercicio 19

Calcular:

$$\iint_R (x+y)^2 e^{x-y} dx dy,$$

donde la región  $R$  está delimitada por:

$$x+y=1, \quad x+y=4, \quad x-y=-1, \quad x-y=1.$$

**Solución.**

$$\int \int_R (x+y)^2 e^{x-y} dx dy,$$

Donde  $R$  está delimitada por las líneas  $x+y=1$ ,  $x+y=4$ ,  $x-y=-1$ , y  $x-y=1$ .

## Cambio de variable

Realizamos el cambio de variables:

$$u = x + y, \quad v = x - y.$$

Ahora bien, para asegurarnos de que el cambio es válido, debemos resolver el sistema  $u = x+y$  y  $v = x-y$  para  $x$  y  $y$ :

$$x = \frac{u+v}{2}, \quad y = \frac{u-v}{2}.$$

Esto muestra que el cambio es invertible, es decir, cada par  $(u,v)$  corresponde a exactamente un par  $(x,y)$ .

El jacobiano del cambio es:

$$\frac{\partial(x,y)}{\partial(u,v)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{vmatrix} = -\frac{1}{2}.$$

Por lo tanto, el valor absoluto del determinante es:

$$\left| \frac{\partial(x,y)}{\partial(u,v)} \right| = \frac{1}{2}.$$

Entonces, el diferencial se ajusta como:  $dx dy = \frac{1}{2} du dv$

## Definimos la región en el plano $(u, v)$

Las ecuaciones que delimitan la región  $R$  en términos de  $u$  y  $v$  son:

$$\begin{aligned}x + y = u &\Rightarrow u \in [1, 4], \\x - y = v &\Rightarrow v \in [-1, 1].\end{aligned}$$

Por lo tanto, en el plano  $(u, v)$ , la región  $R$  es un rectángulo con:

$$1 \leq u \leq 4, \quad -1 \leq v \leq 1.$$

## Reescribimos la integral aplicando el cambio de variable

Al realizar el cambio, la integral queda de la siguiente manera:

$$\int_{u=1}^4 \int_{v=-1}^1 u^2 e^v \cdot \frac{1}{2} dv du.$$

$$\frac{1}{2} \int_{u=1}^4 \int_{v=-1}^1 u^2 e^v dv du.$$

## Resolver la integral

Integral respecto a  $v$ :

$$\int_{v=-1}^1 e^v dv = [e^v]_{v=-1}^1 = e^1 - e^{-1}.$$

Sustituir en la integral respecto a  $u$ :

$$\frac{1}{2} \int_{u=1}^4 u^2 (e - e^{-1}) du.$$

Sacamos el factor constante  $(e - e^{-1})$ :

$$\frac{e - e^{-1}}{2} \int_{u=1}^4 u^2 du.$$

Integramos respecto a  $u$  y evaluamos:

$$\int_{u=1}^4 u^2 du = \left[ \frac{u^3}{3} \right]_{u=1}^4 = \frac{4^3}{3} - \frac{1^3}{3} = \frac{64}{3} - \frac{1}{3} = \frac{63}{3} = 21.$$



Sustituimos el resultado

$$\frac{e - e^{-1}}{2} \cdot 21 = \frac{21}{2}(e - e^{-1}).$$

Resultado:

$$I = \frac{21}{2}(e - e^{-1}).$$

### Ejercicio 20

Sea  $T : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$  definida por:

$$T(u, v, w) = (u \cos v \cos w, u \sin v \cos w, u \sin w).$$

- (a) Muestra que  $T$  está dentro de la esfera unitaria; es decir, cada  $(x, y, z)$  con  $x^2 + y^2 + z^2 = 1$  puede ser escrita como  $(x, y, z) = T(u, v, w)$  para algún  $(u, v, w)$ .
- (b) Muestra que  $T$  no es uno a uno.

**Solución.**

Sea  $T : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$  definida por:

$$T(u, v, w) = (u \cos v \cos w, u \sin v \cos w, u \sin w).$$

### (a) $T$ está sobre la esfera unitaria

Para demostrar que cualquier punto  $(x, y, z)$  tal que  $x^2 + y^2 + z^2 = 1$  puede escribirse como  $(x, y, z) = T(u, v, w)$  para algún  $(u, v, w)$ .

### Expresamos $x^2 + y^2 + z^2$ en términos de $T$

Sea  $(x, y, z) = T(u, v, w)$ , es decir:

$$x = u \cos v \cos w, \quad y = u \sin v \cos w, \quad z = u \sin w.$$

Entonces, el cuadrado de la norma es:

$$x^2 + y^2 + z^2 = (u \cos v \cos w)^2 + (u \sin v \cos w)^2 + (u \sin w)^2.$$

Agrupando términos, tenemos:

$$x^2 + y^2 + z^2 = u^2 \cos^2 w (\cos^2 v + \sin^2 v) + u^2 \sin^2 w.$$

Como  $\cos^2 v + \sin^2 v = 1$ , se simplifica a:

$$x^2 + y^2 + z^2 = u^2 \cos^2 w + u^2 \sin^2 w.$$

Usando  $\cos^2 w + \sin^2 w = 1$ , obtenemos:

$$x^2 + y^2 + z^2 = u^2.$$

## Relación con la esfera unitaria

Para que  $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ , es necesario que  $u^2 = 1$ , lo cual implica  $u = \pm 1$ .

Dado un punto  $(x, y, z)$  con  $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ , podemos escribir:

$$u = \pm 1, \quad v = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right), \quad w = \sin^{-1}(z/u).$$

Por lo tanto, con esto demostramos que cualquier punto en la esfera unitaria puede escribirse como  $T(u, v, w)$  para algún  $(u, v, w)$ .

## (b) $T$ no es uno a uno

Para demostrar que  $T(u, v, w)$  no es inyectiva, es decir, que existen  $(u_1, v_1, w_1) \neq (u_2, v_2, w_2)$  tales que  $T(u_1, v_1, w_1) = T(u_2, v_2, w_2)$ .

## Igualdad bajo $T$

Supongamos que  $T(u_1, v_1, w_1) = T(u_2, v_2, w_2)$ . Entonces:

$$(u_1 \cos v_1 \cos w_1, u_1 \sin v_1 \cos w_1, u_1 \sin w_1) = (u_2 \cos v_2 \cos w_2, u_2 \sin v_2 \cos w_2, u_2 \sin w_2).$$

Esto implica que:

$$u_1 \cos v_1 \cos w_1 = u_2 \cos v_2 \cos w_2, \quad u_1 \sin v_1 \cos w_1 = u_2 \sin v_2 \cos w_2, \quad u_1 \sin w_1 = u_2 \sin w_2.$$

Notemos que:

- Si  $u_1 = -u_2$ , entonces  $T(u_1, v_1, w_1) = T(u_2, v_2, w_2)$ , ya que  $u$  solo escala las coordenadas de acuerdo con la definición de  $T$ .
- Además, los ángulos  $v$  y  $w$  son periódicos. Por ejemplo,  $v_1 = v_2 + 2\pi k$  y  $w_1 = w_2 + 2\pi k$  generan las mismas coordenadas bajo  $T$ .

Por lo tanto,  $T(u, v, w)$  no es inyectiva porque existen múltiples valores de  $(u, v, w)$  que producen el mismo punto  $(x, y, z)$ .

**Ejercicio 21**

Integrate  $x^2 + y^2 + z^2$  over the cylinder  $x^2 + y^2 \leq 2$ ,  $-2 \leq z \leq 3$

**Solución.**

Primero representemos la region  $C$  en coordenadas cilindricas como  $C^*$ , entonces por definición

$$x = r \cos \theta$$

$$y = r \sin \theta$$

$$z = z$$

Así,  $r$  y  $\theta$  esta en

$$r > 0, 0 \leq \theta \leq 2\pi, z \in \mathbb{R}$$

así con el cambio de coordenadas cilindricas, después, obtenemos

$$x^2 + y^2 \leq 2 \Rightarrow (r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta)^2 \leq 2$$

$$\Rightarrow r^2 (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) \leq 2$$

$$\Rightarrow r^2 \leq 2$$

Así por propiedades de orden, tenemos que  $r$

$$0 < r \leq \sqrt{2}$$

Por lo tanto, la región  $C^*$  esta descrita como

$$C^* = \{(r, \theta, z) | 0 < r \leq \sqrt{2} \wedge 0 \leq \theta \leq 2\pi \wedge -2 \leq z \leq 3\}$$

Ahora obtenemos el jacobiano, para ello, calculemos la jacobiana

$$J = \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(r, \theta, z)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial x}{\partial \theta} & \frac{\partial x}{\partial z} \\ \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial \theta} & \frac{\partial y}{\partial z} \\ \frac{\partial z}{\partial r} & \frac{\partial z}{\partial \theta} & \frac{\partial z}{\partial z} \end{pmatrix}$$

Calculando las parciales y reemplazando en la jacobiana obtenemos

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

Calculando el determinante obtenemos

$$J = \begin{vmatrix} \cos \theta & -r \sin \theta \\ \sin \theta & r \cos \theta \end{vmatrix}$$

$$\det(J) = \cos \theta \cdot (r \cos \theta) + (-r \sin \theta) \cdot (\sin \theta)$$

$$\Rightarrow \det(J) = r(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) = r$$

Por el cambio de variable, podemos decir que

$$\iiint_C (x^2 + y^2 + z^2) dx dy dz = \iiint_{C^*} (r^2 + z^2) r dr d\theta dz.$$

Asi, integrando tenemos

$$\iiint_{C^*} (r^2 + z^2) r dr d\theta dz = \int_0^{2\pi} \int_{-2}^3 \int_0^{\sqrt{2}} (r^3 + z^2 r) dr dz d\theta$$

$$= \int_0^{2\pi} \int_{-2}^3 \left[ \int_0^{\sqrt{2}} (r^3 + z^2 r) dr \right] dz d\theta$$

$$= \int_0^{2\pi} \int_{-2}^3 \left[ \frac{r^4}{4} + \frac{z^2 r^2}{2} \right]_0^{\sqrt{2}} dz d\theta$$

$$= \int_0^{2\pi} \int_{-2}^3 (1 + z^2) dz d\theta$$

$$\int_0^{2\pi} \left[ \int_{-2}^3 (1 + z^2) dz \right] d\theta$$

$$= \int_0^{2\pi} d\theta \cdot \int_{-2}^3 (1 + z^2) dz$$

$$= 2\pi \left[ z + \frac{z^3}{3} \right]_{-2}^3$$

$$= 2\pi \left( 3 + 9 + 2 + \frac{8}{3} \right)$$

$$= 2\pi \left( 14 + \frac{8}{3} \right) = 2\pi \cdot \frac{50}{3} = \frac{100\pi}{3}$$

Así podemos concluir que

$$\iiint_C (x^2 + y^2 + z^2) dx dy dz = \frac{100\pi}{3}$$

### Ejercicio 22

Evaluate

$$\int_0^\infty e^{-4x^2} dx$$

**Solución.**

Igualemos la expresión a  $I$

$$I = \int_0^\infty e^{-4x^2} dx$$

ahora bien, definamos

$$\int_0^\infty e^{-4y^2} dy$$

y multipliquemos ambas integrales por el teorema de Fubini, entonces

$$I^2 = \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-4(x^2+y^2)} dx dy$$

Apliquemos cambio de coordenadas a coordenadas cilíndricas, por definición tenemos

$$x = r \cos \theta \wedge y = r \sin \theta$$

Por como está definida la distancia de un radio obtenemos

$$\begin{aligned} r^2 &= (r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta)^2 \\ \Rightarrow r^2 &= r^2 \cos^2 \theta + r^2 \sin^2 \theta \\ \Rightarrow r^2 &= r^2 (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) \end{aligned}$$

y por identidades trigonométricas tenemos

$$r^2 = r^2$$

De esta manera podemos confirmar que

$$r^2 = x^2 + y^2$$

Ahora bien, obtenemos el jacobiano

$$\frac{\partial (x, y)}{\partial (r, \theta)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial x}{\partial \theta} \\ \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial \theta} \end{pmatrix}$$

Obteniendo las derivadas parciales de  $x = r \cos \theta$ , tenemos

$$\frac{\partial x}{\partial r} = \cos \theta \wedge \frac{\partial x}{\partial \theta} = -r \sin \theta$$

Obteniendo derivadas parciales de  $y = r \sin \theta$  tenemos

$$\frac{\partial y}{\partial r} = \sin \theta \wedge \frac{\partial y}{\partial \theta} = r \cos \theta$$

Así la jacobiana es

$$J = \begin{pmatrix} \cos \theta & -r \sin \theta \\ \sin \theta & r \cos \theta \end{pmatrix}$$

El determinante es

$$\begin{aligned} \det(J) &= (\cos \theta)(r \cos \theta) - (-r \sin \theta)(\sin \theta) \\ &\Rightarrow \det(J) = r \cos^2 \theta + r \sin^2 \theta \\ &\Rightarrow \det(J) = r (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) \\ &\Rightarrow \det(J) = r \end{aligned}$$

Ahora notemos que la doble integral utiliza solamente el primer cuadrante, esto porque va de 0 a  $\infty$ , al aplicar el cambio de variable

$$r \in [0, \infty]$$

$$\theta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$$

Ahora bien, regresando a la integral, tenemos

$$I^2 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\infty} e^{-4r^2} r dr d\theta$$

Ya que  $e^{-4r^2}$  depende solo de  $r$ , y la otra función depende solo de  $\theta$ , se pueden separar las integrales como

$$I^2 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \int_0^{\infty} e^{-4r^2} dr$$

Integrando  $d\theta$ , tenemos

$$I^2 = \frac{\pi}{2} \int_0^{\infty} e^{-4r^2} dr$$

Ahora para la otra integral, apliquemos un cambio de variable, tomemos  $u = 4r^2$ , derivando

$$\frac{du}{dr} = 8r \Rightarrow du = 8r dr \Rightarrow dr = \frac{du}{8}$$

Cuando  $r \rightarrow \infty$ , entonces  $u \rightarrow \infty$ , así sustituyendo

$$\int_0^\infty e^{-4r^2} dr = \frac{1}{8} \int_0^\infty e^{-u} du = \frac{1}{8} (e^{-u}|_0^\infty) = \frac{1}{8} (0 - 1) = -\frac{1}{8}$$

Esto porque cuando  $u \rightarrow \infty$ , hace que  $e^{-u} \rightarrow 0$  porque la función exponencial decrece rápidamente, así bien, obtenemos

$$I^2 = \frac{\pi}{2} \left( \frac{1}{8} \right) = \frac{\pi}{16}$$

$$I = \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{16}} = \frac{\sqrt{\pi}}{4}$$

Así podemos concluir que

$$\int_0^\infty e^{-4x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{4}$$

### Ejercicio 23

Sea  $B$  la bola unitaria. Evalúa

$$\iiint \frac{dx dy dz}{\sqrt{2 + x^2 + y^2 + z^2}}$$

haciendo el cambio apropiado de variables

### Solución.

Solución.

Para resolver nuestra integral haremos un cambio de variables a coordenadas esféricas donde:

$$x = \rho \sin \phi \cos \theta$$

$$y = \rho \sin \phi \sin \theta$$

$$z = \rho \cos \phi$$

$$\rho^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

$$dx dy dz = \rho^2 \sin \phi d\rho d\phi d\theta$$

Al ser  $B$  una bola unitaria, definimos nuestros límites de la siguiente forma

$$0 \leq \phi \leq \pi$$

$$0 \leq \theta \leq 2\pi$$

$$0 \leq \rho \leq 1$$

Reescribiendo la integral:

$$\iiint_B \frac{dx dy dz}{\sqrt{2 + x^2 + y^2 + z^2}} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^1 \frac{\rho^2 \sin \phi}{\sqrt{2 + \rho^2}} d\rho d\phi d\theta$$

Solucionando

$$\int_0^1 \frac{p^2 \operatorname{sen} \phi}{\sqrt{2 + \phi^2}} d\rho \Rightarrow \operatorname{sen} \phi \int_0^1 \frac{\rho^2}{\sqrt{2 + \rho^2}} d\rho.$$

definimos a  $u$  y  $\rho$ :

$$\rho = \sqrt{2} \tan(u) \Rightarrow u = \arctan\left(\frac{\rho}{\sqrt{2}}\right), \quad d\rho = \sqrt{2} \sec^2(u) du$$

Realizamos la sustitución en nuestra integral

$$\begin{aligned} & \int \frac{2^{3/2} \sec^2(u) \tan^2(u)}{\sqrt{2 \tan^2(u) + 2}} du \\ & 2 \tan^2(u) + 2 = 2 \sec^2(u) \\ \Rightarrow & \int \frac{2^{3/2} \sec^2(u) \tan^2(u)}{\sqrt{2 \tan^2(u) + 2}} = 2 \int \sec(u) \tan^2(u) du \\ & \tan^2(u) = \sec^2(u) - 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \Rightarrow 2 \int \sec^3(u) - \sec(u) du \\ & \Rightarrow 2 \left[ \int \sec^3(u) du - \int \sec(u) du \right] \end{aligned}$$

Resolviendo

$$\int \sec^3(u) du = \frac{\sec(u) \tan(u)}{2} + \frac{1}{2} \int \sec(u) du$$

Resolviendo

$$\int \sec(u) du = \ln(\tan(u) + \sec(u))$$

Reemplazamos las soluciones

$$\begin{aligned} & 2 \int \sec(u) \tan^2(u) du \\ & = -2 \left[ \frac{\sec(u) \tan(u)}{2} + \frac{\ln(\tan(u) + \sec(u))}{2} - \ln(\tan(u) + \sec(u)) \right] \\ & = \sec(u) \tan(u) - \ln(\tan(u) + \sec(u)) \end{aligned}$$

## Ejercicio 24

**Solución.**



### Ejercicio 25

Evaluate  $\iiint_W \frac{dx dy dz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}$ , where  $W$  is the solid bounded by the two spheres  $x^2 + y^2 + z^2 = a^2$  and  $x^2 + y^2 + z^2 = b^2$ , where  $0 < b < a$ .

#### Solución.

Note que en este caso parece apropiada utilizar un cambio de variable con coordenadas esféricas, pues  $W$  está acotada por esferas y sabemos que  $x^2 + y^2 + z^2$  puede remplazarse por  $p^2$ , obteniendo así una integral mucho más sencilla. Además, la región descrita en este ejercicio es la siguiente

#### Gráfica

Entonces, si  $W^*$  es la región dada por

$$b \leq p \leq a, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi, \quad 0 \leq \phi \leq \pi$$

Aplicando la fórmula del cambio de variables con coordenadas esféricas

$$\iiint_W \frac{dx dy dz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} = \iiint_{W^*} \frac{1}{(p^2)^{3/2}} \cdot p^2 \sin \phi dp d\theta d\phi = \iiint_{W^*} \frac{1}{p} \sin \phi dp d\theta d\phi$$

Y por el teorema de Fubini esta última integral es igual a la siguiente integral iterada

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_b^a \frac{1}{p} \sin \phi dp d\phi d\theta &= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi [\log |p| \sin \phi]_{p=b}^{p=a} d\phi d\theta \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \log \left( \frac{a}{b} \right) \sin \phi d\phi d\theta \\ &= \log \left( \frac{a}{b} \right) \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin \phi d\phi d\theta \\ &= \log \left( \frac{a}{b} \right) \int_0^{2\pi} [-\cos \phi]_{\phi=0}^{\phi=\pi} d\theta \\ &= \log \left( \frac{a}{b} \right) \int_0^{2\pi} 2 d\theta \\ &= 2 \log \left( \frac{a}{b} \right) \int_0^{2\pi} d\theta \\ &= 2 \log \left( \frac{a}{b} \right) (2\pi) \\ &= 4\pi \log \left( \frac{a}{b} \right) \end{aligned}$$

Por lo tanto

$$\iiint_W \frac{dx dy dz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} = 4\pi \log\left(\frac{a}{b}\right)$$

### Ejercicio 26

Use spherical coordinates to evaluate:

$$\int_0^3 \int_0^{\sqrt{9-x^2}} \int_0^{\sqrt{9-x^2-y^2}} \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{1 + [x^2 + y^2 + z^2]^2} dz dy dx$$

**Solución.**

### Ejercicio 27

Sea un triángulo en el plano  $(x, y)$  con vértices  $(0, 0)$ ,  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ ,  $(1, 0)$ , evalúa:

$$\iint_D \cos\left(\pi \frac{x-y}{x+y}\right) dx dy$$

Haciendo el cambio de variables apropiado.

**Solución.**

Definimos la región triangular. La región está limitada por tres líneas conectadas entre los vértices del triángulo:

- Para  $(0, 0)$  y  $(1, 0)$ :

$$y = 0$$

- Para  $(0, 0)$  y  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ :

$$y = x$$

- Para  $(1, 0)$  y  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ :

Pendiente:  $\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\frac{1}{2}-0}{\frac{1}{2}-1} = -1$ ,

$$y = 1 - x$$

De aquí definimos los límites de integración:

$$0 \leq x \leq 1, \quad 0 \leq y \leq 1 - x$$

Hasta ahora la integral queda como:

$$\int_0^1 \int_0^{1-x} \cos\left(\pi \frac{x-y}{x+y}\right) dy dx$$

Definimos las nuevas variables:

$$u = x - y, \quad v = x + y$$

Calculamos el Jacobiano para ajustar las diferenciales. Resolvemos el sistema:

$$u = x - y, \quad v = x + y$$

$$x = u + y$$

Sustituyendo en  $v$ :

$$v = u + y + y = u + 2y \quad \rightarrow \quad y = \frac{v - u}{2}$$

Sustituyendo en  $x = u + y$ :

$$x = u + \frac{v - u}{2} = \frac{v + u}{2}$$

Para el Jacobiano:

$$dx \, dy = \begin{vmatrix} \frac{\partial(x)}{\partial(u)} & \frac{\partial(x)}{\partial(v)} \\ \frac{\partial(y)}{\partial(u)} & \frac{\partial(y)}{\partial(v)} \end{vmatrix} du \, dv$$

$$J = \begin{vmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{vmatrix} = \frac{1}{2}$$

Transformamos los límites de la integral. Usamos los vértices originales: - Para  $(0, 0)$ :

$$u = x - y = 0, \quad v = x + y = 0 \quad \rightarrow \quad (u, v) = (0, 0)$$

- Para  $(1, 0)$ :

$$u = x - y = 1, \quad v = x + y = 1 \quad \rightarrow \quad (u, v) = (1, 1)$$

- Para  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ :

$$u = x - y = 0, \quad v = x + y = 1 \quad \rightarrow \quad (u, v) = (0, 1)$$

Por lo tanto:

$$0 \leq v \leq 1, \quad 0 \leq u \leq v$$

Con estos cambios, la integral queda como:

$$\begin{aligned} & \int_0^1 \int_0^v \cos\left(\pi \frac{u}{v}\right) \frac{1}{2} du \, dv \\ &= \frac{1}{2} \int_0^1 \int_0^v \cos\left(\pi \frac{u}{v}\right) du \, dv \end{aligned}$$

Ahora resolvemos la integral del tipo:

$$\int \cos\left(\pi \frac{x}{y}\right) dx$$

Por cambio de variable:

$$u = \frac{\pi x}{y}, \quad du = \frac{\pi}{y} dx$$

La solución es:

$$\frac{y}{\pi} \int \cos(u) du = \frac{y}{\pi} \sin\left(\frac{\pi x}{y}\right) + C$$

Aplicando a nuestra integral definida:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \int_0^1 \frac{v}{\pi} \sin\left(\frac{\pi u}{v}\right) \Big|_0^v dv \\ &= \frac{1}{2} \int_0^1 \frac{v}{\pi} (\sin(\pi) - \sin(0)) dv \\ &= \frac{1}{2} \int_0^1 0 dv = 0 \end{aligned}$$

Dado que el coseno es una función oscilatoria simétrica, los valores positivos y negativos se cancelan entre sí. Por lo tanto, el resultado es:

$$\therefore \int_0^1 \int_0^{1-x} \cos\left(\pi \frac{x-y}{x+y}\right) dy dx = 0$$

### Ejercicio 28

La región  $D$  está definida por  $0 \leq x \leq y$ ,  $x^2 + y^2 \leq 1$  y la integral:

$$\iint_D x^2 dx dy$$

### Solución.

Por la condición  $x^2 + y^2 \leq 1$ , que asociamos a un círculo unitario, convendremos en usar coordenadas polares, donde:

$$x = r \cos \theta \quad y = r \sin \theta \quad y \quad r^2 = x^2 + y^2$$

Y también sabemos que la relación en la transformación de las diferenciales es:

$$dx dy = r dr d\theta$$

Ahora, para el cambio de variables tenemos que:

- Para la condición  $x^2 + y^2 \leq 1$  implica que  $0 \leq r \leq 1$ .
- Para la condición  $0 \leq x \leq y$  implica que la relación  $\tan \theta = \frac{y}{x}$ , es decir,  $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{4}$ .

Una vez hechos los cambios, nuestra integral quedaría como:

$$\iint_D x^2 dx dy = \int_0^{\frac{\pi}{4}} \int_0^1 (r \cos \theta)^2 r dr d\theta$$

Resolviendo, tenemos:

$$\begin{aligned} & \int_0^{\frac{\pi}{4}} \int_0^1 r^3 \cos^2 \theta dr d\theta \\ & \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos^2 \theta \cdot \frac{r^4}{4} \Big|_0^1 d\theta \\ & \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos^2 \theta \left( \frac{1}{4} - \frac{0}{4} \right) d\theta \\ & \frac{1}{4} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos^2 \theta d\theta \end{aligned}$$

Usaremos una identidad para  $\cos^2 \theta = \frac{1+\cos(2\theta)}{2}$ , lo sustituimos y tenemos:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{4} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{1 + \cos(2\theta)}{2} d\theta \\ & \frac{1}{4} \left( \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{1}{2} d\theta + \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{\cos(2\theta)}{2} d\theta \right) \\ & \frac{1}{4} \left( \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{1}{2} d\theta + \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \cos(2\theta) d\theta \right) \end{aligned}$$

Para la integral del tipo  $\int \cos(2\theta) d\theta$ , resolvemos por cambio de variable:

$$u = 2\theta \quad \text{y} \quad du = 2 d\theta$$

Obtenemos:

$$\frac{1}{2} \int \cos(u) du = \frac{1}{2} \sin(u) = \frac{1}{2} \sin(2\theta)$$

Sustituimos en la integral definida:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{4} \left( \frac{\theta}{2} \Big|_0^{\frac{\pi}{4}} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} \sin(2\theta) \Big|_0^{\frac{\pi}{4}} \right) \right) \\ & = \frac{1}{4} \left( \frac{\pi}{8} + \frac{1}{4} \left( \sin \left( \frac{2\pi}{4} \right) - \sin(2 \cdot 0) \right) \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{4} \left( \frac{\pi}{8} + \frac{1}{4}(1-0) \right) \\
&= \frac{1}{4} \left( \frac{\pi}{8} + \frac{1}{4} \right) \\
&= \frac{1}{4} \left( \frac{4\pi + 8}{32} \right) \\
&= \frac{4\pi + 8}{4(32)} = \frac{\pi + 2}{32}
\end{aligned}$$

$\therefore$  El área de la región  $D$  es  $\frac{\pi + 2}{32}$

### Ejercicio 29

Solución.

### Ejercicio 30

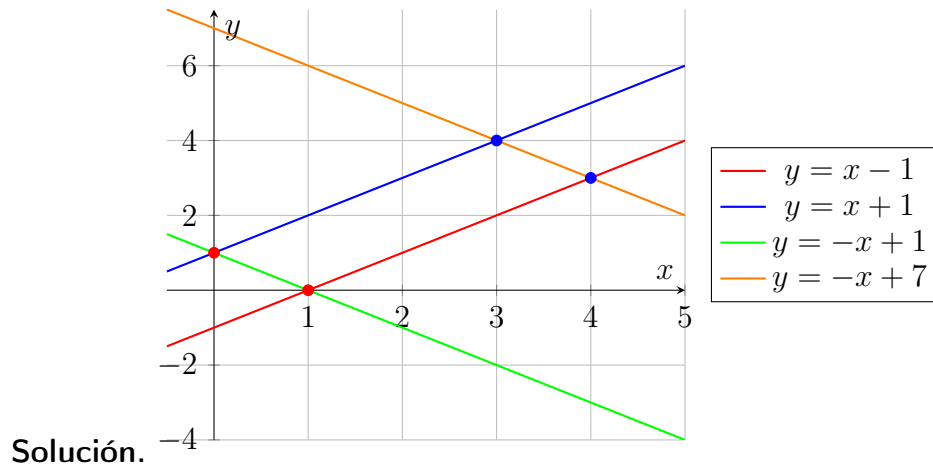
Solución.

### Ejercicio 31

Evaluate:

$$\iint_B (x + y) \, dx \, dy$$

Where  $B$  is the rectangle in the  $xy$  plane with vertices at  $(0, 1)$ ,  $(1, 0)$ ,  $(3, 4)$ ,  $(4, 3)$ .



Obteniendo las funciones que intersecan en los puntos  $(0, 1)$ ,  $(1, 0)$ ,  $(3, 4)$ ,  $(4, 3)$ , podemos realizar el cambio de variable:

$$y = x - 1 \quad (1)$$

$$y = x + 1 \quad (2)$$

$$y = -x + 1 \quad (3)$$

$$y = -x + 7 \quad (4)$$

Despejando ecuaciones semejantes:

$$u = y - x, \quad v = y + x.$$

Donde

$$-1 \leq u \leq 1, \quad 1 \leq v \leq 7.$$

## Transformación de variables

Sumando y restando las dos ecuaciones se despeja  $x$  y  $y$

$$x = \frac{u + v}{2}, \quad y = \frac{v - u}{2}.$$

Por lo que llegamos a  $T(u, v) = \left(\frac{u+v}{2}, \frac{v-u}{2}\right)$

## Determinante Jacobiano

$$\frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} = \begin{vmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{vmatrix} = \frac{1}{4} - \left(-\frac{1}{4}\right) = \frac{1}{2}$$

Con esto:

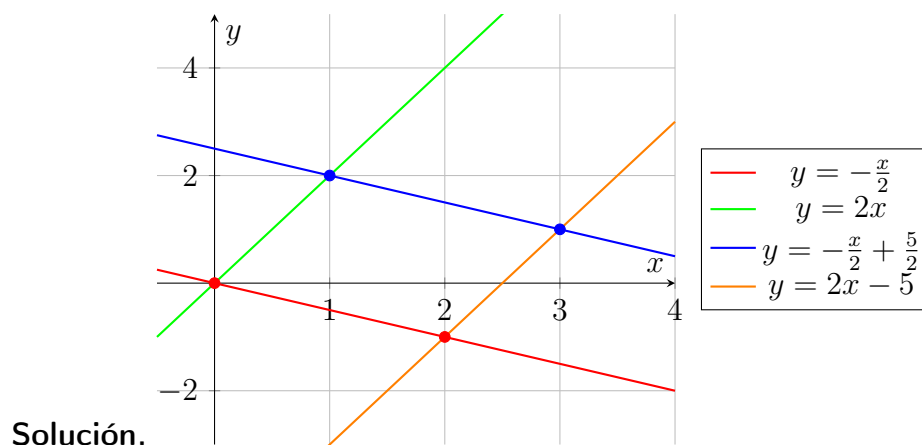
$$\begin{aligned}
 \iint_B (x+y) \, dx \, dy &= \int_1^7 \int_{-1}^1 \frac{1}{2} \left( \frac{v-u}{2} + \frac{v+u}{2} \right) \, du \, dv \\
 &= \frac{1}{2} \int_1^7 \int_{-1}^1 v \, du \, dv \\
 &= \frac{1}{2} \int_1^7 2v \, dv \\
 &= \frac{v^2}{2} \Big|_1^7 \\
 &= \frac{49}{2} - \frac{1}{2} \\
 &= 24
 \end{aligned}$$

### Ejercicio 32

Evaluate:

$$\iint_D (x+y) \, dx \, dy$$

Where  $D$  is the square with vertices at  $(0,0)$ ,  $(1,2)$ ,  $(3,1)$ ,  $(2,-1)$ .



Obteniendo las funciones que intersecan en los puntos  $(0,1)$ ,  $(1,0)$ ,  $(3,4)$ ,  $(4,3)$ , podemos



realizar el cambio de variable:

$$y = -\frac{x}{2} \tag{5}$$

$$y = -\frac{x}{2} + \frac{5}{2} \tag{6}$$

$$y = 2x \tag{7}$$

$$y = 2x - 5 \tag{8}$$

Despejando ecuaciones semejantes:

$$u = y + \frac{x}{2}, \quad v = y - 2x.$$

Donde

$$0 \leq u \leq \frac{5}{2}, \quad -5 \leq v \leq 0.$$

## Transformación de variables

Sumando y restando las dos ecuaciones se despeja  $x$  y  $y$

$$x = \frac{2u - 2v}{5}, \quad y = \frac{4u + v}{5}.$$

Por lo que llegamos a  $T(u, v) = \left(\frac{2u-2v}{5}, \frac{4u+v}{5}\right)$

## Determinante Jacobiano

$$\frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} = \begin{vmatrix} -\frac{2}{5} & \frac{2}{5} \\ -\frac{1}{5} & \frac{4}{5} \end{vmatrix} = -\frac{8}{25} - \frac{2}{25} = -\frac{2}{5}$$

Con esto:

$$\begin{aligned}
 \iint_D (x+y) dx dy &= \int_0^{\frac{5}{2}} \int_{-5}^0 -\frac{2}{5} \left( \frac{2u-2v}{5} + \frac{4u+v}{5} \right) du dv \\
 &= -\frac{2}{5} \int_0^{\frac{5}{2}} \int_{-5}^0 \left( \frac{6u}{5} - \frac{v}{5} \right) du dv \\
 &= -\frac{2}{5} \int_0^{\frac{5}{2}} \left[ \frac{3u^2}{5} - \frac{vu}{5} \right]_{-5}^0 dv \\
 &= \frac{2}{5} \int_0^{\frac{5}{2}} (v+15) dv \\
 &= \frac{2}{5} \left[ \frac{v^2}{2} + 15v \right]_0^{\frac{5}{2}} \\
 &= \frac{2}{5} \left[ \frac{325}{8} \right] \\
 &= \frac{65}{4}
 \end{aligned}$$

### Ejercicio 33

Let  $E$  be the ellipsoid  $(x^2/a^2) + (y^2/b^2) + (z^2/c^2) \leq 1$ , where  $a, b$  and  $c$  are positive.

(a) Find the volume of  $E$

(b) Evaluate  $\iiint_E (x^2/a^2) + (y^2/b^2) + (z^2/c^2) dx dy dz$

### Solución.

Tenemos que el elipsoide está definido por:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \leq 1$$

en donde  $a, b, c > 0$

Aplicamos el cambio de variables:

$$x = au, \quad y = bv, \quad z = cw$$

entonces, tenemos:

$$\frac{(au)^2}{a^2} + \frac{(bv)^2}{b^2} + \frac{(cw)^2}{c^2} \leq 1$$

$$= u^2 + v^2 + w^2 \leq 1$$

Con esto podemos mapear el elipsoide a una esfera unitaria en el espacio  $uvw$

Después calculamos el Jacobiano del cambio de variables:

$$\det(J) = \left| \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial y}{\partial v} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial z}{\partial w} \end{bmatrix} \right| = |abc|$$

Con lo que tenemos que:

$$dx \, dy \, dz = |abc| \, du \, dv \, dw$$

Ahora bien, sabemos que el volumen de una esfera unitaria en el espacio  $\mathbb{R}^3$  es  $\frac{4\pi}{3}$

Por lo que  $V_E = |abc| \cdot \frac{4\pi}{3}$

$$V_E = \frac{4\pi abc}{3}$$

Ahora, procedemos a calcular la integral:

$$\iiint_E \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \, dx \, dy \, dz$$

Aplicamos el mismo cambio de variable:

$$x = au, \quad y = bv, \quad z = cw$$

Con esto nos queda:

$$\iiint_E \frac{(au)^2}{a^2} + \frac{(bv)^2}{b^2} + \frac{(cw)^2}{c^2} |abc| \, du \, dv \, dw$$

$$= abc \cdot \iiint_{u^2+v^2+w^2 \leq 1} u^2 + v^2 + w^2 \, du \, dv \, dw$$

Ahora bien, debemos transformar nuestra integral utilizando coordenadas esféricas:

$$u = \rho \sin\phi \cos\theta, \quad v = \rho \sin\phi \sin\theta, \quad w = \rho \cos\phi$$

$$du \, dv \, dw = \rho^2 \sin\phi \, d\rho \, d\phi \, d\theta$$

además,  $\rho \in [0, 1]$ ,  $\phi \in [0, \pi]$ , y  $\theta \in [0, 2\pi]$

Ahora sí, sustituimos en la integral:

$$abc \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^1 \rho^2 \cdot \rho^2 \sin\phi \, d\rho \, d\phi \, d\theta$$

Podemos separar las integrales:

$$abc \cdot \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\pi \sin\phi \, d\phi \int_0^1 \rho^4 \, d\rho$$

$$\int_0^{2\pi} d\theta = 2\pi$$

$$\int_0^\pi \sin\phi \, d\phi = 2$$

$$\int_0^1 \rho^4 \, d\rho = \frac{1}{5}$$

Por último, multiplicamos todos los términos:

$$abc \cdot 2\pi \cdot 2 \cdot \frac{1}{5} = \frac{4\pi abc}{5}$$

Así que:

$$\iiint_E \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \, dx \, dy \, dz = \frac{4\pi abc}{5}$$

### Ejercicio 34

Calcular la integral de  $f(\rho, \phi, \theta) = \frac{1}{\rho}$  en coordenadas esféricas sobre la región en el primer octante de  $\mathbb{R}^3$ , que está delimitada por los conos  $\phi = \frac{\pi}{4}$ ,  $\phi = \arctan(2)$  y la esfera  $\rho = \sqrt{6}$ .

### Solución.

Primero debemos definir los límites de integración:

Para la coordenada radial  $\rho$ , la distancia del origen al punto tenemos que  $\rho = \sqrt{6}$ . Lo que significa que  $\rho$  varía de 0 a  $\sqrt{6}$ . Por lo tanto, los límites para  $\rho$  son:  $0 \leq \rho \leq \sqrt{6}$ .

Ahora bien, el ángulo polar  $\phi$ , es el ángulo de la proyección del punto con respecto al eje z. En este caso, la región está acotada por dos conos:

1.  $\phi = \frac{\pi}{4}$
2.  $\phi = \arctan(2)$

Por lo tanto, los límites para  $\phi$  son:  $\frac{\pi}{4} \leq \phi \leq \arctan(2)$ .

Finalmente,  $\theta$  el ángulo en el plano XY, está limitado por:  $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$

En coordenadas esféricas, el diferencial de volumen es:

$$dV = \rho^2 \sin(\phi) d\rho d\phi d\theta.$$

Habiendo definido los límites de integración para cada coordenada, podemos escribir la integral como:

$$\iiint_R \frac{1}{\rho} dV = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\arctan(2)} \int_0^{\sqrt{6}} \frac{1}{\rho} \rho^2 \sin(\phi) d\rho d\phi d\theta.$$

Simplificando la función:

$$\frac{1}{\rho} \rho^2 \sin(\phi) = \rho \sin(\phi),$$

la integral la reescribimos como:

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\arctan(2)} \int_0^{\sqrt{6}} \rho \sin(\phi) d\rho d\phi d\theta.$$

### Integral respecto a $\rho$

$$\int_0^{\sqrt{6}} \rho d\rho = \left[ \frac{\rho^2}{2} \right]_0^{\sqrt{6}} = \frac{6}{2} = 3.$$

Esto reduce la integral a:

$$3 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\arctan(2)} \sin(\phi) d\phi d\theta.$$

### Integral respecto a $\phi$

La integral respecto a  $\phi$  es:

$$\int_{\frac{\pi}{4}}^{\arctan(2)} \sin(\phi) d\phi = [-\cos(\phi)]_{\frac{\pi}{4}}^{\arctan(2)}.$$

Calculamos los valores:

$$\cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad \cos(\arctan(2)) = \frac{1}{\sqrt{5}}.$$

Entonces:

$$\int_{\frac{\pi}{4}}^{\arctan(2)} \sin(\phi) d\phi = -\frac{1}{\sqrt{5}} + \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

### Integral respecto a $\theta$

La integral respecto a  $\theta$  es:

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} 1 d\theta = \frac{\pi}{2}.$$

### Resultado:

El resultado de la integral es:

$$\iiint_{\text{región}} \frac{1}{\rho} dV = 3 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \left( \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{1}{\sqrt{5}} \right).$$

Así, el valor de la integral es:

$$\boxed{\frac{3\pi}{2} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{1}{\sqrt{5}} \right)}.$$

### Ejercicio 35

#### Solución.

La transformación  $T(u, v) = (u^2 - v^2, 2uv)$  transforma el rectángulo  $1 \leq u \leq 2$ ,  $1 \leq v \leq 3$  del plano  $uv$  en una región  $R$  del plano  $xy$ .

- (a) Mostrar que  $T$  es uno a uno.
- (b) Encontrar el área de  $R$  utilizando la fórmula de cambio de variables.

### Demostración de que la transformación es uno a uno

Para demostrar que  $T$  es uno a uno, asumimos que existen dos puntos  $(u_1, v_1)$  y  $(u_2, v_2)$  tales que:

$$T(u_1, v_1) = T(u_2, v_2).$$

Esto implica:

$$\begin{aligned}u_1^2 - v_1^2 &= u_2^2 - v_2^2, \\2u_1v_1 &= 2u_2v_2.\end{aligned}$$

De la segunda ecuación, tenemos que  $u_1v_1 = u_2v_2$ . Al sustituir esto en la primera ecuación y resolver para  $u_1, v_1$  en términos de  $u_2, v_2$ , concluimos que  $u_1 = u_2$  y  $v_1 = v_2$ , demostrando que  $T$  es uno a uno.

## Cálculo del Jacobiano

El determinante del Jacobiano de  $T(u, v)$  se calcula como:

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{vmatrix},$$

donde  $x = u^2 - v^2$  y  $y = 2uv$ . Por lo tanto:

$$J = \begin{vmatrix} 2u & -2v \\ 2v & 2u \end{vmatrix} = (2u)(2u) - (-2v)(2v) = 4u^2 + 4v^2.$$

## Configuración de la integral para el área

El área de la región  $R$  está dada por la integral doble:

$$\text{Área de } R = \iint_R \frac{1}{|J|} dA,$$

donde  $|J| = 4u^2 + 4v^2$ . En términos de las coordenadas  $u, v$ , la integral es:

$$\text{Área de } R = \int_{u=1}^2 \int_{v=1}^3 \frac{1}{4u^2 + 4v^2} dv du.$$

## Resolución paso a paso

### Paso 1: Simplificar el integrando

El integrando es:

$$\frac{1}{4u^2 + 4v^2} = \frac{1}{4(u^2 + v^2)}.$$

### Paso 2: Configurar la integral interna

La integral interna es:

$$\int_{v=1}^3 \frac{1}{u^2 + v^2} dv.$$

### Paso 3: Resolver la integral interna

La integral de  $\frac{1}{u^2+v^2}$  respecto a  $v$  es:

$$\int \frac{1}{u^2+v^2} dv = \frac{1}{u} \arctan\left(\frac{v}{u}\right).$$

Evaluyendo de  $v = 1$  a  $v = 3$ :

$$\frac{1}{u} \left[ \arctan\left(\frac{3}{u}\right) - \arctan\left(\frac{1}{u}\right) \right].$$

### Paso 4: Configurar la integral externa

La integral externa se convierte en:

$$\int_{u=1}^2 \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{u} \left[ \arctan\left(\frac{3}{u}\right) - \arctan\left(\frac{1}{u}\right) \right] du.$$

### Paso 5: Resolver la integral externa

Dividimos la integral en dos términos:

$$\int_{u=1}^2 \frac{1}{u} \arctan\left(\frac{3}{u}\right) du - \int_{u=1}^2 \frac{1}{u} \arctan\left(\frac{1}{u}\right) du.$$

Utilizando herramientas computacionales, se obtiene que el valor aproximado de la integral es:

$$\text{Área de } R \approx 0.0722.$$

## Concepto clave

Una integral doble evalúa el volumen bajo una superficie descrita por una función  $f(x, y)$  sobre una región específica en el plano  $xy$ . El proceso involucra:

1. **Integral interna:** Se fija una variable (por ejemplo,  $x$ ) y se integra  $f(x, y)$  respecto a  $y$  en los límites dados, calculando un "corte" del volumen para un valor específico de  $x$ .
2. **Integral externa:** Se integra el resultado de la integral interna respecto a  $x$  en sus límites, sumando todos los cortes para obtener el volumen total.

En este problema, se utilizó la función racional  $f(u, v) = \frac{1}{4(u^2+v^2)}$ , lo que requirió usar propiedades de la función arcotangente durante la integración.

### Ejercicio 36



**Solución.**

## Parte (a): Esbozar la región $R$

La región  $R$  está definida por:

1. Dentro del círculo:  $x^2 + y^2 = 1$ ,
2. Fuera de la parábola:  $x^2 + y^2 = 2y$ ,
3. Con restricciones:  $x \geq 0$  y  $y \geq 0$  (primer cuadrante).

Los pasos para esbozar  $R$ :

- El círculo  $x^2 + y^2 = 1$  es un círculo estándar de radio 1 centrado en el origen.
- Reescribiendo la parábola  $x^2 + y^2 = 2y$  obtenemos  $x^2 + (y - 1)^2 = 1$ , que es un círculo de radio 1 centrado en  $(0, 1)$ .
- La región  $R$  es la porción del círculo unitario  $x^2 + y^2 = 1$  que se encuentra fuera del círculo  $x^2 + (y - 1)^2 = 1$  y dentro del primer cuadrante.

## Parte (b): Esbozar $D$ bajo el cambio de variables

El cambio de coordenadas es:

$$u = x^2 + y^2, \quad v = x^2 + y^2 - 2y.$$

Pasos:

1. De las ecuaciones:
  - $u = x^2 + y^2$ , que representa la distancia radial al cuadrado en coordenadas polares.
  - $v = u - 2y \implies y = \frac{u-v}{2}$ .
2. Los límites de  $R$  en coordenadas  $u, v$ :
  - El círculo  $x^2 + y^2 = 1$  se transforma en  $u = 1$ .
  - El círculo  $x^2 + (y - 1)^2 = 1$  se transforma en  $v = 1$ .
3. La región  $D$  en el plano  $uv$  es un triángulo definido por:
  - $u = 1$  (límite superior),
  - $v = 1$  (límite inferior),
  - $v \leq u$  (asegurando  $y \geq 0$ ).

## Parte (c): Calcular $\iint_R x e^x dx dy$

La integral se evaluará utilizando el cambio de variables. Pasos clave:

1. **Encontrar el Jacobiano:** Calcular el determinante de la matriz Jacobiana para la transformación.

$$u = x^2 + y^2, \quad v = x^2 + y^2 - 2y.$$

Diferenciamos  $u$  y  $v$  respecto a  $x$  y  $y$ .

2. **Cambiar los límites de la integral:** Usar la región  $D$  en el plano  $uv$ .
3. **Transformar el integrando y calcular:** Sustituir  $x$ ,  $e^x$  y el determinante de Jacobiano en la integral.

El determinante del Jacobiano para la transformación es  $-4x$ . Esto se incorpora a la integral al transformar las variables.

La integral transformada es:

$$\iint_D (x e^x \cdot |-4x|) du dv.$$

Donde  $D$  está definido por:

- $1 \leq u \leq 1$  (frontera del círculo),
- $1 \leq v \leq u$  (triángulo en el plano  $uv$ ).

El valor de la integral evaluada es 0. Este resultado surge porque la función  $x e^x \cdot (-4x)$  integrada sobre la región simétrica  $R$  (o equivalente  $D$ ) se cancela debido a la simetría o cambios de signo en el espacio transformado.

## Resumen de resultados

1. La región  $R$  es la porción del círculo unitario  $x^2 + y^2 = 1$  fuera del círculo  $x^2 + (y-1)^2 = 1$ , confinada al primer cuadrante.
2. Bajo el cambio de coordenadas,  $R$  se transforma en una región triangular  $D$  en el plano  $uv$ , definida por  $1 \leq u \leq 1$  y  $1 \leq v \leq u$ .
3. La integral  $\iint_R x e^x dx dy$  evalúa a 0.

## Explicación del concepto clave

El teorema de cambio de variables permite transformar una región y el integrando a una forma más simple introduciendo nuevas variables. El determinante de Jacobiano escala el elemento de área (o volumen) para tener en cuenta la distorsión debido a la transformación.

En este problema:

1. La región original  $R$  se describió en términos de  $x, y$ , pero la transformación la simplificó a una región triangular  $D$  en coordenadas  $uv$ .
2. La integral se transformó adecuadamente, con el determinante de Jacobiano asegurando el escalado correcto del área diferencial.

La región  $D$  es degenerada porque los límites  $u = 1$  y  $v = 1$  colapsan la región triangular en un segmento de línea, lo que significa que:

$$\iint_D = 0.$$

El resultado confirma que la integral evalúa a cero.

### Ejercicio 37

**Solución.**

## Parametrización de la región $D$

La región  $D$  está definida por la ecuación:

$$x^{3/2} + y^{3/2} = a^{3/2}, \quad \text{para } x \geq 0 \text{ y } y \geq 0.$$

Consideramos todos los puntos  $(x, y)$  en el primer cuadrante que satisfacen esta restricción. Los ejes coordenados proporcionan límites, formando una región delimitada en el primer cuadrante.

## Transformación de variables

Realizamos un cambio de variables para simplificar la región  $D$ . Sea:

$$u = x^{3/2}, \quad v = y^{3/2}.$$

La transformación resulta en:

$$x = u^{2/3}, \quad y = v^{2/3}.$$

En consecuencia, la ecuación original  $x^{3/2} + y^{3/2} = a^{3/2}$  se transforma en:

$$u + v = a^{3/2}.$$

## La región $D^*$ en las nuevas variables

La región  $D^*$  está definida como:

$$0 \leq u \leq a^{3/2}, \quad 0 \leq v \leq a^{3/2} - u.$$

Esto produce una región triangular en el espacio  $(u, v)$ , delimitada por la línea  $u + v = a^{3/2}$  y los ejes coordenados.

## Jacobiano de la transformación

Necesitamos calcular el Jacobiano de la transformación para reescribir el elemento de área  $dx dy$ . La transformación  $x = u^{2/3}$ ,  $y = v^{2/3}$  nos lleva a las derivadas parciales:

$$\frac{\partial x}{\partial u} = \frac{2}{3}u^{-1/3}, \quad \frac{\partial y}{\partial v} = \frac{2}{3}v^{-1/3}.$$

Esto resulta en el determinante del Jacobiano:

$$J = \begin{vmatrix} \frac{2}{3}u^{-1/3} & 0 \\ 0 & \frac{2}{3}v^{-1/3} \end{vmatrix} = \frac{4}{9}u^{-1/3}v^{-1/3}.$$

## Expresión de la integral sobre $D^*$

Finalmente, expresamos la integral doble sobre la región  $D$  como una integral sobre  $D^*$ . La integral se convierte en:

$$\iint_D f(x, y) dx dy = \int_0^{a^{3/2}} \int_0^{a^{3/2}-u} f(u^{2/3}, v^{2/3}) \cdot \frac{4}{9}u^{-1/3}v^{-1/3} dv du.$$

Cada  $(x, y)$  corresponde a un par  $(u, v)$ , transformando los límites e involucrando el Jacobiano.

## Conceptos clave

### Cambio de variables

Para resolver integrales dobles complejas, un cambio de variables puede simplificar la integración. En este tema, transformamos las variables de integración del sistema de coordenadas original a uno nuevo, con el propósito de simplificar la región y el cálculo.

En este caso, la región original está definida por la ecuación  $x^{3/2} + y^{3/2} = a^{3/2}$ . Al introducir las nuevas variables  $u = x^{3/2}$  y  $v = y^{3/2}$ , la ecuación se transforma en  $u + v = a^{3/2}$ , convirtiendo la región en una forma más manejable.

Las nuevas variables  $u$  y  $v$  describen una región triangular. Este cambio de variables es una herramienta efectiva para navegar por regiones complejas en integrales dobles.

## Jacobiano

El Jacobiano es esencial al realizar un cambio de variables en integrales dobles. Ajusta el factor de escala que ocurre durante la transformación. Básicamente, al cambiar de sistemas de coordenadas, los elementos de área  $dx dy$  se transforman en  $du dv$  mediante un factor de escala llamado determinante del Jacobiano.

En nuestra transformación de  $(x, y)$  a  $(u, v)$ , el Jacobiano se deriva de las derivadas parciales:

$$\frac{\partial x}{\partial u} = \frac{2}{3}u^{-1/3}, \quad \frac{\partial y}{\partial v} = \frac{2}{3}v^{-1/3}.$$

La matriz Jacobiana es diagonal, y el determinante del Jacobiano es:

$$J = \frac{4}{9}u^{-1/3}v^{-1/3}.$$

Este determinante se utiliza en la integral transformada para ajustar el cambio en la escala del área de un sistema de coordenadas a otro.

## Parametrización

La parametrización implica expresar una región geométrica en términos de un conjunto diferente de variables. Es una técnica utilizada para mapear regiones complicadas en formas paramétricas más simples.

Para la región dada  $D$ , la ecuación  $x^{3/2} + y^{3/2} = a^{3/2}$  se parametriza mediante  $u$  y  $v$ , con la transformación:

$$x = u^{2/3}, \quad y = v^{2/3}.$$

Esto convierte la condición de frontera en:

$$u + v = a^{3/2}.$$

Esta parametrización redefine  $D$  en una región triangular más simple  $D^*$  en el espacio  $(u, v)$ . Así, la parametrización se alinea estrechamente con el cambio de variables y es una herramienta efectiva para integrales dobles.

### Ejercicio 38

**Solución.**

## Paso 1: Entender la transformación a coordenadas esféricas

La transformación  $S(\rho, \theta, \phi)$  está definida como:

$$S(\rho, \theta, \phi) = (x, y, z),$$

donde:

$$x = \rho \sin \phi \cos \theta, \quad y = \rho \sin \phi \sin \theta, \quad z = \rho \cos \phi.$$

Aquí, las variables tienen las siguientes restricciones:

- $\rho \geq 0$  (radio),
- $0 \leq \phi \leq \pi$  (ángulo polar),
- $0 \leq \theta < 2\pi$  (ángulo azimutal).

## Paso 2: Condiciones para que sea inyectiva (uno a uno)

Para que la transformación sea uno a uno, debemos demostrar que si dos puntos en coordenadas esféricas se transforman al mismo punto en coordenadas cartesianas, entonces representan las mismas coordenadas esféricas. Esto requiere resolver:

$$S(\rho_1, \theta_1, \phi_1) = S(\rho_2, \theta_2, \phi_2),$$

o equivalentemente:

$$\rho_1 \sin \phi_1 \cos \theta_1 = \rho_2 \sin \phi_2 \cos \theta_2,$$

$$\rho_1 \sin \phi_1 \sin \theta_1 = \rho_2 \sin \phi_2 \sin \theta_2,$$

$$\rho_1 \cos \phi_1 = \rho_2 \cos \phi_2.$$

## Paso 3: Análisis de los posibles casos

### 1. Caso 1: $\rho = 0$

Cuando  $\rho = 0$ , todas las coordenadas esféricas mapean al origen  $(0, 0, 0)$ . Por lo tanto, la transformación no es uno a uno en este punto.

### 2. Caso 2: $\rho > 0$

En este caso, asumimos  $S(\rho_1, \theta_1, \phi_1) = S(\rho_2, \theta_2, \phi_2)$ . Esto implica:

$$\sin \phi_1 \cos \theta_1 = \sin \phi_2 \cos \theta_2, \quad \sin \phi_1 \sin \theta_1 = \sin \phi_2 \sin \theta_2, \quad \cos \phi_1 = \cos \phi_2.$$

- De  $\cos \phi_1 = \cos \phi_2$ , se deduce que  $\phi_1 = \phi_2$  o  $\phi_1 = \pi - \phi_2$ .

- Sustituyendo  $\phi_1 = \phi_2$ , las ecuaciones para  $x$  e  $y$  se reducen a:

$$\cos \theta_1 = \cos \theta_2, \quad \sin \theta_1 = \sin \theta_2.$$

Esto implica que  $\theta_1 = \theta_2$  (módulo  $2\pi$ ).

- Para  $\phi_1 = \pi - \phi_2$ , obtenemos  $z_1 = -z_2$ . Este escenario corresponde a una simetría alrededor del eje  $z$ , lo que significa que la transformación falla en ser uno a uno a lo largo de los polos ( $\phi = 0$  y  $\phi = \pi$ ).

## Paso 4: Identificar el conjunto problemático

La transformación  $S(\rho, \theta, \phi)$  no es uno a uno en los siguientes casos:

- En el origen ( $\rho = 0$ ),
- A lo largo de los ejes  $z$  positivo y negativo ( $\phi = 0$  o  $\phi = \pi$ ).

Estos conjuntos pueden describirse como gráficas de funciones continuas:

- El punto  $\rho = 0$  corresponde a una gráfica degenerada.
- Los ejes  $\phi = 0$  y  $\phi = \pi$  corresponden a relaciones continuas donde  $z = \pm\rho$ .

## Respuesta final

La transformación a coordenadas esféricas  $S(\rho, \theta, \phi)$  es uno a uno excepto en el conjunto  $\rho = 0$  y la unión de los polos ( $\phi = 0$  y  $\phi = \pi$ ), los cuales son uniones de gráficas de funciones continuas.

## Concepto clave

El concepto clave es el comportamiento de las transformaciones a coordenadas esféricas y las condiciones bajo las cuales no son inyectivas.

## Explicación del concepto clave

Las coordenadas esféricas mapean un espacio tridimensional a ángulos polares y distancias radiales. Aunque la transformación es mayormente inyectiva (uno a uno), las degeneraciones surgen debido a la simetría a lo largo de ciertos ejes ( $\phi = 0, \pi$ ) y en el origen ( $\rho = 0$ ). Estas excepciones corresponden a casos en los que diferentes coordenadas esféricas resultan en el mismo punto cartesiano.