

NOTAS SOBRE SUPERFICIES REGULARES

MIGUEL DOMÍNGUEZ VÁZQUEZ

RESUMEN. Estas notas proporcionan un resumen de los principales conceptos y resultados sobre la teoría clásica de superficies regulares en el espacio euclídeo 3-dimensional.

1. SUPERFICIES REGULARES

1.1. Concepto de superficie regular y ejemplos. Una *superficie regular* en \mathbb{R}^3 es un subconjunto no vacío S de \mathbb{R}^3 tal que, para todo punto $p \in S$, existe un abierto U de \mathbb{R}^2 , un entorno abierto V de p en S (con la topología relativa de $S \subset \mathbb{R}^3$) y una aplicación $\mathbf{x}: U \rightarrow V \subset S \subset \mathbb{R}^3$ tal que:

1. \mathbf{x} es diferenciable como aplicación de $U \subset \mathbb{R}^2$ a \mathbb{R}^3 ,
2. $\mathbf{x}: U \rightarrow V$ es un homeomorfismo,
3. para todo $q \in U$, la diferencial $d\mathbf{x}(q): \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$ es inyectiva.

La aplicación \mathbf{x} se llama *parametrización* o *sistema de coordenadas (locales)* de S . Su inversa $\mathbf{x}^{-1}: V \rightarrow U$ se llama *carta (coordenada)*. El abierto V de S se llama *entorno coordinado*.

En general, una superficie regular S puede necesitar más de una parametrización para ser descrita, es decir, puede suceder que $V = \mathbf{x}(U) \subsetneq S$. Es el caso de una esfera, un cilindro, un cono o un hiperboloide de una hoja, por ejemplo. Si una superficie S admite una parametrización \mathbf{x} tal que su imagen sea toda S , necesariamente S es homeomorfa a un abierto de \mathbb{R}^2 .

Sea $\mathbf{x}: U \rightarrow \mathbb{R}^3$ una parametrización de una superficie regular S . Denotemos las coordenadas cartesianas del abierto U de \mathbb{R}^2 por (u, v) , y sean $x(u, v)$, $y(u, v)$, $z(u, v)$ las componentes de $\mathbf{x}(u, v)$, de modo que $\mathbf{x}(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$. Entonces, para cada $q = (u, v) \in U$ podemos considerar los vectores de \mathbb{R}^3 obtenidos al calcular las derivadas parciales de \mathbf{x} :

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_u(u, v) &= \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial u}(u, v) = (x_u(u, v), y_u(u, v), z_u(u, v)), \\ \mathbf{x}_v(u, v) &= \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial v}(u, v) = (x_v(u, v), y_v(u, v), z_v(u, v)).\end{aligned}$$

Estos vectores se llaman los *vectores coordinados* en el punto $\mathbf{x}(u, v) \in S$. Puesto que están definidos para todo $(u, v) \in U$, determinan dos campos (diferenciables) \mathbf{x}_u y \mathbf{x}_v en el abierto V de S , denominados *campos coordinados* asociados a la parametrización \mathbf{x} . Obsérvese que $\mathbf{x}_u(u, v) = d\mathbf{x}(u, v)e_1$ y $\mathbf{x}_v(u, v) = d\mathbf{x}(u, v)e_2$, donde $\{e_1, e_2\}$ es la base canónica de \mathbb{R}^2 . Por tanto, la condición 3 de la definición de superficie equivale a que $\mathbf{x}_u(u, v)$ y $\mathbf{x}_v(u, v)$ sean

linealmente independientes para todo $(u, v) \in \mathbb{R}^2$. Nótese también que el campo \mathbf{x}_u es tangente a las curvas obtenidas como imagen por \mathbf{x} de los segmentos de rectas horizontales $v = \text{constante}$, mientras que \mathbf{x}_v es tangente a la imagen por \mathbf{x} de los segmentos de rectas verticales $u = \text{constante}$.

Dos importantes familias de ejemplos de superficies regulares son las siguientes:

1. Los *grafos* de funciones diferenciables: si U es un abierto de \mathbb{R}^2 y $f: U \rightarrow \mathbb{R}$ es una función diferenciable, entonces el conjunto $G(f) = \{(u, v, f(u, v)) \in \mathbb{R}^3 : (u, v) \in U\}$ es una superficie regular.
2. Las *superficies de nivel* de valores regulares de funciones diferenciables: si $f: V \subset \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ es una función diferenciable y $a \in \mathbb{R}$ es un valor regular de f (es decir, $df(q) \neq 0$ para todo $q \in f^{-1}(a)$), entonces $f^{-1}(a)$ es una superficie regular.

1.2. Funciones diferenciables definidas en superficies. Sea S una superficie regular. Una función $f: S \rightarrow \mathbb{R}^m$ se dice *diferenciable* si, para toda parametrización $\mathbf{x}: U \rightarrow \mathbb{R}^3$ de S , la función $f \circ \mathbf{x}: U \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^m$ es diferenciable. Para ver si $f: S \rightarrow \mathbb{R}^m$ es diferenciable, basta comprobar que: para todo $p \in S$, existe una parametrización \mathbf{x} de S alrededor de p tal que $f \circ \mathbf{x}$ es diferenciable. Son siempre funciones diferenciables en S : la restricción $F|_S$ de una función diferenciable F definida en un abierto de \mathbb{R}^3 que contenga a S , o la suma, producto y cociente (siempre que tenga sentido) de funciones diferenciables en S .

Sea ahora $f: S_1 \rightarrow S_2$ una aplicación entre dos superficies regulares S_1 y S_2 . Diremos que f es *diferenciable* si, para cada $p \in S_1$, hay una parametrización $\mathbf{x}_1: U_1 \rightarrow S_1$ con $p \in \mathbf{x}_1(U_1)$ y una parametrización $\mathbf{x}_2: U_2 \rightarrow S_2$ con $f(p) \in \mathbf{x}_2(U_2)$ tales que $\tilde{f} := \mathbf{x}_2^{-1} \circ f \circ \mathbf{x}_1$ es diferenciable como aplicación entre dos abiertos de \mathbb{R}^2 . La aplicación \tilde{f} se llama *expresión en coordenadas* de la función f . La composición de funciones diferenciables entre superficies es diferenciable.

Una aplicación $f: S_1 \rightarrow S_2$ entre dos superficies regulares es un *difeomorfismo* si f es homomorfismo y tanto f como f^{-1} son funciones diferenciables. Diremos que dos superficies son *difeomorfas* si existe un difeomorfismo entre ellas.

1.3. El plano tangente. Sea S una superficie regular en \mathbb{R}^3 y $p \in S$. Un vector $x \in \mathbb{R}^3$ diremos que es un *vector tangente* a S en p si existe una curva diferenciable $\alpha: (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow S \subset \mathbb{R}^3$ tal que $\alpha(0) = p$ y $\alpha'(0) = x$. En esta definición se puede tomar (en vez de $(-\epsilon, \epsilon)$, con $\epsilon > 0$) cualquier otro intervalo de definición para α y cualquier t_0 en dicho intervalo en vez de 0, simplemente reparametrizando la curva.

El subconjunto de \mathbb{R}^3 dado por todos los vectores tangentes en p a S

$$T_p S = \{x \in \mathbb{R}^3 : \text{existe } \alpha: (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow S \text{ diferenciable tal que } \alpha(0) = p, \alpha'(0) = x\}$$

resulta ser un subespacio vectorial de \mathbb{R}^3 de dimensión 2 y, de hecho,

$$T_p S = d\mathbf{x}(q)(\mathbb{R}^2),$$

para cualquier parametrización $\mathbf{x}: U \rightarrow S$, y donde $q \in U$ es tal que $\mathbf{x}(q) = p$. Al subespacio vectorial $T_p S$ se le llama *plano tangente* (o *espacio tangente*) a S en p . Al plano afín $p + T_p S$ le llamamos *plano tangente afín* a S en p .

Podemos considerar el subespacio vectorial de \mathbb{R}^3 perpendicular a $T_p S$:

$$(T_p S)^\perp := \{x \in \mathbb{R}^3 : \langle x, y \rangle = 0, \text{ para todo } y \in T_p X\},$$

que se llama *recta normal* (o *espacio normal*) a S en p , mientras que sus elementos se llaman *vectores normales* a S en p . Así, para cada $p \in S$, se puede escribir la suma directa ortogonal $\mathbb{R}^3 = T_p S \oplus (T_p S)^\perp$. Además, para cada $p \in S$ existen exactamente dos vectores unitarios en $(T_p S)^\perp$, uno opuesto del otro; cada uno de ellos se llama *vector normal unitario* a S en p , y, una vez escogido uno de los dos, se suele denotar por $N(p)$.

1.4. Diferencial de una aplicación definida en una superficie. Sea $f: S \rightarrow \mathbb{R}$ una función diferenciable definida en una superficie regular S , y sea $p \in S$. La *diferencial* de f en p es la aplicación lineal

$$df(p): T_p S \rightarrow \mathbb{R}, \quad df(p)x := (f \circ \alpha)'(0),$$

donde $\alpha: (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow S$ es una curva diferenciable en S tal que $\alpha(0) = p$ y $\alpha'(0) = x$. Se prueba que $df(p)x$ está así bien definida, es decir, $(f \circ \alpha)'(0)$ es independiente de la curva α elegida (siempre que $\alpha(0) = p$ y $\alpha'(0) = x$).

Si \mathbf{x} es una parametrización de S alrededor de p , i.e. $p = \mathbf{x}(u_0, v_0)$ para cierto (u_0, v_0) , entonces la matriz asociada a la aplicación lineal $df(p)$ en la base $\{\mathbf{x}_u(u_0, v_0), \mathbf{x}_v(u_0, v_0)\}$ es la matriz fila $((f \circ \mathbf{x})_u(u_0, v_0), (f \circ \mathbf{x})_v(u_0, v_0))$.

Sea $f: S \rightarrow \mathbb{R}$ una aplicación diferenciable. Entonces, si f es constante, $df(p) = 0$ para todo $p \in S$; recíprocamente en el caso en que S sea conexa, si $df(p) = 0$ para todo $p \in S$ entonces f es constante en S . Si f tiene un extremo relativo en p , entonces $df(p) = 0$.

Sea ahora $f: S_1 \rightarrow S_2$ una aplicación diferenciable entre dos superficies regulares, y $p \in S_1$. Se define la *diferencial* de f en p como la aplicación lineal

$$df(p): T_p S_1 \rightarrow T_{f(p)} S_2, \quad df(p)x := (f \circ \alpha)'(0),$$

donde $\alpha: (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow S_1$ es una curva diferenciable en S_1 tal que $\alpha(0) = p$ y $\alpha'(0) = x$. Al igual que arriba, esta definición es independiente de α .

Sea $f: S_1 \rightarrow S_2$ una aplicación diferenciable entre superficies, y $p \in S_1$. Consideremos parametrizaciones \mathbf{x}_1 e \mathbf{x}_2 de S_1 y S_2 alrededor de p y $f(p)$, respectivamente. Entonces la expresión en coordenadas $\tilde{f} = \mathbf{x}_2^{-1} \circ f \circ \mathbf{x}_1$ de f se puede escribir como $\tilde{f}(u, v) = (\bar{u}(u, v), \bar{v}(u, v))$ para ciertas funciones reales diferenciables \bar{u} y \bar{v} de dos variables. Así, la matriz asociada a la diferencial de f en $p = \mathbf{x}(u_0, v_0)$ con respecto a la base de vectores coordenados $\{(\mathbf{x}_1)_u(q_1), (\mathbf{x}_1)_v(q_1)\}$ de $T_p S_1$ y la base de vectores coordenados $\{(\mathbf{x}_2)_{\bar{u}}(q_2), (\mathbf{x}_2)_{\bar{v}}(q_2)\}$ de $T_{f(p)} S_2$, donde $q_1 = (u_0, v_0)$ y $q_2 = (\bar{u}(u_0, v_0), \bar{v}(u_0, v_0))$, es la matriz jacobiana

$$df(p) \equiv \begin{pmatrix} \bar{u}_u(u_0, v_0) & \bar{u}_v(u_0, v_0) \\ \bar{v}_u(u_0, v_0) & \bar{v}_v(u_0, v_0) \end{pmatrix},$$

donde, como de costumbre, los subíndices u y v denotan derivada parcial con respecto a u o v , respectivamente.

La diferencial de aplicaciones entre superficies cumple la regla de la cadena. Es decir, si $f: S_1 \rightarrow S_2$ y $g: S_2 \rightarrow S_3$ son aplicaciones diferenciables entre superficies, entonces

$$d(g \circ f)(p) = dg(f(p)) \circ df(p), \quad p \in S_1.$$

Se tiene también que si $f: S_1 \rightarrow S_2$ es una aplicación diferenciable y $p \in S_1$, entonces f es un *difeomorfismo local* en p (es decir, existe un entorno abierto V de p en S_1 tal que que $f|_V: V \rightarrow f(V)$ es difeomorfismo entre superficies) si y solo si $df(p): T_p S_1 \rightarrow T_{f(p)} S_2$ es un isomorfismo de espacios vectoriales.

1.5. Primera forma fundamental. Sea S una superficie regular en \mathbb{R}^3 , y $p \in S$. La *primera forma fundamental* de S en p es la forma bilineal simétrica definida positiva

$$I_p: T_p S \times T_p S \rightarrow \mathbb{R}, \quad I_p(x, y) := \langle x, y \rangle.$$

Es decir, no es más que el producto interior de \mathbb{R}^3 restringido a cada plano tangente. A veces se le llama primera forma fundamental a la forma cuadrática asociada, $x \in T_p S \mapsto I_p(x, x) = \langle x, x \rangle$.

Si nos dan una parametrización $\mathbf{x}: U \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow S$ de S , y $p = \mathbf{x}(u_0, v_0) \in S$, entonces podemos calcular la matriz de la primera forma fundamental de S en p en la base $\mathcal{B} = \{\mathbf{x}_u(u_0, v_0), \mathbf{x}_v(u_0, v_0)\}$ de vectores coordenados, calculando

$$(I_p)_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle \mathbf{x}_u, \mathbf{x}_u \rangle & \langle \mathbf{x}_u, \mathbf{x}_v \rangle \\ \langle \mathbf{x}_u, \mathbf{x}_v \rangle & \langle \mathbf{x}_v, \mathbf{x}_v \rangle \end{pmatrix},$$

donde hemos eliminado la dependencia en las coordenadas (u_0, v_0) de p para no recargar la notación. A menudo escribiremos simplemente

$$(1) \quad I \equiv \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle \mathbf{x}_u, \mathbf{x}_u \rangle & \langle \mathbf{x}_u, \mathbf{x}_v \rangle \\ \langle \mathbf{x}_u, \mathbf{x}_v \rangle & \langle \mathbf{x}_v, \mathbf{x}_v \rangle \end{pmatrix},$$

donde el símbolo \equiv significa que identificamos una aplicación bilineal con su matriz asociada en una determinada base, que debe quedar clara en cada contexto (aquí se trata de la base de vectores coordenados). Así, si $x, y \in T_p S$ tienen coordenadas respectivas (x^1, x^2) y (y^1, y^2) en la base $\{\mathbf{x}_u, \mathbf{x}_v\}$, se tiene que

$$I_p(x, y) = \langle x, y \rangle = (x^1, x^2) \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y^1 \\ y^2 \end{pmatrix}.$$

Aquí hay que prestar atención a que al escribir $\langle x, y \rangle$ estamos refiriéndonos al producto interior de dos vectores en \mathbb{R}^3 , y no al producto interior estándar de los vectores en \mathbb{R}^2 con coordenadas (x^1, x^2) y (y^1, y^2) . También es frecuente escribir la primera forma fundamental como forma diferencial:

$$I = E du^2 + 2F du dv + G dv^2.$$

Los coeficientes E , F y G son funciones diferenciables en el abierto U de definición de la parametrización \mathbf{x} , y se denominan los *coeficientes de la primera forma fundamental* asociados a la parametrización \mathbf{x} . Además, es fácil ver que siempre se tiene que $E > 0$, $G > 0$ y $EG - F^2 > 0$.

Observa que si $\alpha: I \rightarrow S$ es una curva diferenciable en S dada por la imagen por \mathbf{x} de una curva en $U \subset \mathbb{R}^2$, es decir, $\alpha(t) = \mathbf{x}(u(t), v(t))$, entonces la longitud de un segmento de curva $\alpha|_{[a,b]}$, con $[a, b] \subset I$, se puede calcular mediante

$$L(\alpha|_{[a,b]}) = \int_a^b \sqrt{I_{\alpha(t)}(\alpha'(t), \alpha'(t))} dt = \int_a^b \sqrt{Eu'(t)^2 + 2Fu'(t)v'(t) + Gv'(t)^2} dt,$$

donde los coeficientes E , F y G han de evaluarse en $(u(t), v(t))$. Asimismo, si R es una región de la superficie S contenida en $\mathbf{x}(U)$, entonces se define su área mediante

$$A(R) := \int_{\mathbf{x}^{-1}(R)} \|\mathbf{x}_u \times \mathbf{x}_v\| du dv = \int_{\mathbf{x}^{-1}(R)} \sqrt{EG - F^2} du dv.$$

1.6. Isometrías y aplicaciones conformes. Una aplicación diferenciable $f: S_1 \rightarrow S_2$ entre superficies regulares se llama *isometría local* si conserva la primera forma fundamental, es decir,

$$\langle df(p)x, df(p)y \rangle = \langle x, y \rangle,$$

para todo $x, y \in T_p S_1$ y todo $p \in S_1$. Así, f es isometría local si y solo si $df(p): T_p S_1 \rightarrow T_p S_2$ es isometría lineal entre espacios vectoriales, para todo $p \in S_1$. Puesto que una isometría lineal es un isomorfismo, se sigue que toda isometría local entre superficies es un difeomorfismo local. Como las isometrías locales preservan el producto escalar, también preservan longitudes, ángulos y áreas.

Una *isometría (global)* entre superficies S_1 y S_2 es un difeomorfismo (global) $f: S_1 \rightarrow S_2$ que es también isometría local. En este caso se dice que S_1 y S_2 son (*globalmente*) *isométricas*. Dos superficies S_1 y S_2 se dicen *localmente isométricas* si para todo $p \in S_1$ existe un entorno abierto V de p en S_1 y una isometría (global) $f: V \rightarrow f(V) \subset S_2$, y análogamente intercambiando S_1 con S_2 .

La motivación para estas distintas definiciones viene del hecho de que existan superficies localmente isométricas, pero no globalmente isométricas. El ejemplo típico es el del plano y el cilindro, que son localmente isométricos, pero no globalmente isométricos. Esto último se prueba usando un concepto topológico denominado grupo fundamental; esencialmente la idea es que el cilindro y el plano no pueden ser homeomorfos porque en el cilindro existen curvas cerradas que no se pueden contraer a un punto sin salirse del cilindro, mientras que en el plano toda curva cerrada se puede deformar a un punto.

Obsérvese la diferencia formal entre la definición de isometría local y la de que dos superficies sean localmente isométricas: que exista una isometría local entre S_1 y S_2 no implica que S_1 y S_2 sean localmente isométricas. Sin embargo, si existe una isometría local sobreyectiva $f: S_1 \rightarrow S_2$, entonces S_1 y S_2 son localmente isométricas.

Si $f: S_1 \rightarrow S_2$ es una isometría local, entonces para todo $p \in S_1$ existe una parametrización $\mathbf{x}_1: U \rightarrow S_1$ alrededor de p y una parametrización $\mathbf{x}_2: U \rightarrow S_2$ alrededor de $f(p)$ tales que los correspondientes coeficientes de las primeras formas fundamentales coinciden, es decir $E_1 = E_2$, $F_1 = F_2$ y $G_1 = G_2$; en otras palabras, la matriz asociada a la primera forma fundamental de S_1 en la base $\{(\mathbf{x}_1)_u, (\mathbf{x}_1)_v\}$ coincide con la matriz asociada a la primera forma fundamental de S_2 en la base $\{(\mathbf{x}_2)_u, (\mathbf{x}_2)_v\}$. Recíprocamente, si S_1 y S_2 son superficies regulares con parametrizaciones respectivas $\mathbf{x}_1: U \rightarrow S_1$ y $\mathbf{x}_2: U \rightarrow S_2$ tales

que $E_1 = E_2$, $F_1 = F_2$ y $G_1 = G_2$, entonces la aplicación $f = \mathbf{x}_2 \circ \mathbf{x}_1^{-1}: \mathbf{x}_1(U) \rightarrow \mathbf{x}_2(U)$ es una isometría (global) entre los abiertos $\mathbf{x}_1(U)$ de S_1 y $\mathbf{x}_2(U)$ de S_2 .

Conviene resaltar la diferencia entre una isometría entre superficies de \mathbb{R}^3 y una isometría o movimiento rígido de \mathbb{R}^3 . Dado un movimiento rígido $\varphi: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ y una superficie regular S en \mathbb{R}^3 , es fácil ver que el subconjunto $\varphi(S)$ de \mathbb{R}^3 es una superficie regular, y la aplicación $\varphi|_S: S \rightarrow \varphi(S)$ es una isometría entre superficies. Dos objetos geométricos en \mathbb{R}^n (como por ejemplo S y $\varphi(S)$ en la frase anterior) que se diferencien por un movimiento rígido de \mathbb{R}^n se dicen *congruentes*. Así, dos superficies regulares congruentes en \mathbb{R}^3 son globalmente isométricas. Sin embargo, el recíproco es falso. Dos superficies pueden ser isométricas y no haber ningún movimiento rígido de \mathbb{R}^3 que envíe una en la otra (por ejemplo, un trozo de cilindro y un trozo de un plano). Las propiedades geométricas que se preservan por isometrías entre superficies se llaman propiedades *intrínsecas*, mientras que aquellas que se preservan por movimientos rígidos de \mathbb{R}^3 se llaman *extrínsecas*.

Un concepto más débil que el de isometría local es el de aplicación conforme. Un difeomorfismo local $f: S_1 \rightarrow S_2$ entre superficies regulares se llama *aplicación conforme* si existe una aplicación diferenciable positiva $\lambda: S_1 \rightarrow \mathbb{R}$ tal que

$$(2) \quad \langle df(p)x, df(p)y \rangle = \lambda(p)\langle x, y \rangle,$$

para todo $x, y \in T_p S_1$ y todo $p \in S_1$. Por tanto, una isometría local es una aplicación conforme con $\lambda \equiv 1$. Una parametrización $\mathbf{x}: U \rightarrow S$ de una superficie S se dice *conforme* o que induce *coordenadas isotermas* si existe una aplicación diferenciable positiva $\lambda: S \rightarrow \mathbb{R}$ cumpliendo (2), con \mathbf{x} en vez de f , para todo $p \in U$ y todo $x, y \in \mathbb{R}^2$, lo cual equivale a que los coeficientes de la primera forma fundamental satisfagan $E = G$ y $F = 0$. Se puede probar que toda superficie admite coordenadas isotermas, por lo que cualesquiera dos superficies son localmente conformes.

Un difeomorfismo local $f: S_1 \rightarrow S_2$ resulta ser conforme si y solo si conserva ángulos, es decir, si dadas cualesquiera curvas $\alpha, \beta: (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow S_1$ con $\alpha(0) = \beta(0) = p$, el ángulo entre $\alpha'(0)$ y $\beta'(0)$ en $T_p S_1$ coincide con el ángulo entre $df(p)\alpha'(0)$ y $df(p)\beta'(0)$ en $T_{f(p)} S_2$.

En coordenadas locales, se pueden caracterizar las aplicaciones conformes $f: S_1 \rightarrow S_2$ de modo similar a como caracterizamos antes las isometrías locales, pero en vez de pedir que los coeficientes de la primera forma fundamental se preserven, se han de preservar salvo multiplicación por una función diferenciable positiva λ .

Un difeomorfismo $f: S_1 \rightarrow S_2$ es una aplicación *equiárea* (o *que preserva áreas*) si para toda región $R \subset S_1$ se tiene que el área de R coincide con el área de $f(R)$. En coordenadas locales, un difeomorfismo es equiárea si y solo si preserva la función $EG - F^2$. Usando esto, es fácil deducir que f es conforme y equiárea si y solo si es una isometría.

2. GEOMETRÍA EXTRÍNSECA DE SUPERFICIES

2.1. La aplicación de Gauss. Sea S una superficie regular en \mathbb{R}^3 , y $\mathbf{x}: U \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow S$ una parametrización de S . Sea N un campo unitario normal diferenciable definido localmente en S . Por ejemplo, sobre el abierto $\mathbf{x}(U)$ de S podemos tomar

$$(3) \quad N(\mathbf{x}(u, v)) = \frac{\mathbf{x}_u(u, v) \times \mathbf{x}_v(u, v)}{\|\mathbf{x}_u(u, v) \times \mathbf{x}_v(u, v)\|}.$$

Entonces N define una aplicación $N: \mathbf{x}(U) \subset S \rightarrow \mathbb{S}^2$ denominada *aplicación de Gauss*; aquí \mathbb{S}^2 denota la esfera de radio 1 centrada en el origen de \mathbb{R}^3 . La aplicación de Gauss no es más que la aplicación que a cada punto de la superficie le asigna el vector normal escogido en ese punto.

En principio, el campo normal unitario definido mediante (3) solo está definido localmente (es decir, en un abierto $\mathbf{x}(U)$ de S , pero tal vez no en toda S). Puede suceder que, mediante otras parametrizaciones de S que recubran S , el campo N se pueda extender de modo diferenciable a un campo normal unitario definido en toda S , o puede suceder que esto sea imposible. Así, una superficie S que admita un campo diferenciable normal unitario definido en toda S se llama *orientable*. Ejemplos de superficies orientables son el plano, la esfera, los grafos y las superficies de nivel. El ejemplo típico de superficie no orientable es la banda de Möbius.

La aplicación de Gauss nos permite definir un endomorfismo J del plano tangente a la superficie en cada punto mediante

$$J: T_p S \rightarrow T_p S, \quad Jx := N(p) \times x.$$

Este endomorfismo no es más que una rotación de 90° en el plano tangente $T_p S$ en el sentido que hace que $\{x, Jx, N(p)\}$ sea una base positivamente orientada, si $x \neq 0$. Obviamente, si cambiamos de signo la aplicación de Gauss, J actúa como una rotación de 90° en el sentido opuesto.

2.2. Operador de forma y segunda forma fundamental. Sea $p = \mathbf{x}(u_0, v_0) \in \mathbf{x}(U) \subset S$. Para entender cómo se curva S en p analizaremos cómo varía N cerca de p . Por eso, consideramos la diferencial de N en p , i.e. $(dN)(p): T_p S \rightarrow T_{N(p)} \mathbb{S}^2$. Pero como

$$T_{N(p)} \mathbb{S}^2 = \{x \in \mathbb{R}^3 : \langle x, N(p) \rangle = 0\} = T_p S,$$

podemos ver esa diferencial como un endomorfismo lineal de $T_p S$, es decir, $(dN)(p): T_p S \rightarrow T_p S$. Esto nos permite definir el *operador de forma* A_p de S en p (también llamado *operador de Weingarten* o *operador de configuración*) como esa diferencial con el signo cambiado:

$$A_p: T_p S \rightarrow T_p S, \quad A_p(x) := -(dN)(p)x.$$

Recuerda qué significa esta definición como diferencial: si $x \in T_p S$, escoge una curva diferenciable $\alpha: (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow S$ con $\alpha(0) = p$ y $\alpha'(0) = x$, y entonces $(dN)(p)x := (N \circ \alpha)'(0)$.

Observa que hay un operador de forma para cada p de S , una vez fijado el campo normal N . De hecho, el operador de forma depende de la elección de N , pero no lo indicamos en la notación para no recargarla; asimismo, a menudo eliminamos el subíndice p si está claro en qué punto trabajamos, o si trabajamos en varios puntos al mismo tiempo.

El operador de forma es autoadjunto respecto del producto escalar de \mathbb{R}^3 :

$$\langle A_p x, y \rangle = \langle x, A_p y \rangle, \quad x, y \in T_p S, \quad p \in S.$$

A partir del operador de forma definimos una forma bilineal simétrica en $T_p S$, denominada *segunda forma fundamental* de S en p :

$$\mathbb{I}_p: T_p S \times T_p S \rightarrow \mathbb{R}, \quad \mathbb{I}_p(x, y) := \langle x, A_p y \rangle.$$

A diferencia de la primera forma fundamental, la segunda forma fundamental no tiene por que ser definida positiva.

2.3. Formas matriciales de A y \mathbb{I} . Si $\mathcal{B} = \{v_1, v_2\}$ es una base de $T_p S$, el operador de forma y la segunda forma fundamental tienen unas matrices asociadas con respecto a esa base (pero el significado de esta frase es distinto para cada uno de los dos casos, pues en el primer caso estamos ante una aplicación lineal, y en el segundo ante una bilineal).

Con respecto al operador de forma, existirán $a_{ij} \in \mathbb{R}$ tales que $A_p v_1 = a_{11}v_1 + a_{21}v_2$ y $A_p v_2 = a_{12}v_1 + a_{22}v_2$, de modo que la matriz de A_p en la base $\mathcal{B} = \{v_1, v_2\}$, que denotaremos $(A_p)_{\mathcal{B}}$, es

$$(A_p)_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}.$$

A menudo escribiremos simplemente

$$A_p \equiv \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix},$$

donde el símbolo \equiv significa que identificamos una aplicación lineal con su matriz asociada en una determinada base (que debe quedar clara en cada contexto). Así, si $x \in T_p S$ tiene coordenadas (x^1, x^2) en la base $\mathcal{B} = \{v_1, v_2\}$, se tiene que las coordenadas de $A_p x$ en esa misma base son las obtenidas al multiplicar

$$(A_p)_{\mathcal{B}} \begin{pmatrix} x^1 \\ x^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^1 \\ x^2 \end{pmatrix}.$$

Hay que observar que la matriz $(A_p)_{\mathcal{B}}$ no tiene por qué ser simétrica si la base \mathcal{B} no es ortonormal. Si \mathcal{B} es ortonormal, entonces $(A_p)_{\mathcal{B}}$ sí es simétrica, al ser A_p autoadjunto.

La descripción matricial de la segunda forma fundamental es ligeramente diferente, al ser una forma bilineal. En este caso, la matriz de \mathbb{I}_p en la base $\mathcal{B} = \{v_1, v_2\}$ viene dada por

$$(\mathbb{I}_p)_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} \mathbb{I}_p(v_1, v_1) & \mathbb{I}_p(v_1, v_2) \\ \mathbb{I}_p(v_2, v_1) & \mathbb{I}_p(v_2, v_2) \end{pmatrix}.$$

Así, si $x, y \in T_p S$ tienen coordenadas respectivas (x^1, x^2) y (y^1, y^2) en la base \mathcal{B} , se puede calcular $\mathbb{I}_p(x, y)$ mediante

$$\mathbb{I}_p(x, y) = (x^1, x^2)(\mathbb{I}_p)_{\mathcal{B}} \begin{pmatrix} y^1 \\ y^2 \end{pmatrix}.$$

A diferencia de $(A_p)_{\mathcal{B}}$, la matriz $(\mathbb{I}_p)_{\mathcal{B}}$ siempre es simétrica, aunque \mathcal{B} no sea ortonormal. Por otro lado, igual que comentamos arriba para A_p , a menudo simplemente usaremos el

símbolo \equiv para identificar una forma bilineal con su matriz asociada en una determinada base.

2.4. Cálculo de \mathbb{I} y A a partir de una parametrización. Sea $\mathbf{x}: U \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$ una parametrización de una superficie regular S . Sea N un campo normal unitario diferenciable en $\mathbf{x}(U)$, por ejemplo el dado por (3). Entonces, la matriz de la segunda forma fundamental de S en un punto $p = \mathbf{x}(u_0, v_0)$ con respecto a la base $\mathcal{B} = \{\mathbf{x}_u(u_0, v_0), \mathbf{x}_v(u_0, v_0)\}$ de vectores coordenados es

$$\mathbb{I}_p \equiv \begin{pmatrix} e & f \\ f & g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle \mathbf{x}_{uu}, N \rangle & \langle \mathbf{x}_{uv}, N \rangle \\ \langle \mathbf{x}_{uv}, N \rangle & \langle \mathbf{x}_{vv}, N \rangle \end{pmatrix},$$

donde en la matriz de la derecha hemos omitido la dependencia de u_0, v_0 para no recargar la notación. Observemos también que $e = \langle \mathbf{x}_{uu}, N \rangle = -\langle \mathbf{x}_u, N_u \rangle$, ya que $\langle \mathbf{x}_u, N \rangle = 0$, y análogamente $f = \langle \mathbf{x}_u, N_v \rangle = \langle \mathbf{x}_v, N_u \rangle$ y $g = \langle \mathbf{x}_v, N_v \rangle$.

Por la definición de segunda forma fundamental tenemos que

$$\langle x, A_p y \rangle = \mathbb{I}_p(x, y), \quad x, y \in T_p S.$$

Si las coordenadas de x e y con respecto a la base de vectores coordenados \mathcal{B} son (x^1, x^2) y (y^1, y^2) , respectivamente, entonces la relación anterior adopta la siguiente expresión en términos de matrices:

$$(x^1, x^2)(\mathbb{I}_p)_{\mathcal{B}}(A_p)_{\mathcal{B}} \begin{pmatrix} y^1 \\ y^2 \end{pmatrix} = (x^1, x^2)(\mathbb{I}_p)_{\mathcal{B}} \begin{pmatrix} y^1 \\ y^2 \end{pmatrix}.$$

Como esta relación se cumple para cualesquiera $x, y \in T_p S$, deducimos que $(\mathbb{I}_p)_{\mathcal{B}}(A_p)_{\mathcal{B}} = (\mathbb{I}_p)_{\mathcal{B}}$, de donde obtenemos la expresión de la matriz del operador de forma respecto a la base de campos coordenados:

$$(4) \quad (A)_{\mathcal{B}} = (\mathbb{I})_{\mathcal{B}}^{-1}(\mathbb{I})_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} e & f \\ f & g \end{pmatrix}.$$

2.5. Curvaturas principales, curvatura de Gauss y curvatura media. El operador de forma en cada punto p de una superficie regular es un endomorfismo lineal autoadjunto del espacio tangente $T_p S$. Su expresión matricial respecto de cualquier base ortonormal de $T_p S$ es, por tanto, una matriz simétrica. Tal matriz es entonces diagonalizable, con autovalores reales, en una base ortonormal. Es decir, existe una base ortonormal $\{e_1, e_2\}$ de $T_p S$ tal que

$$A_p e_1 = \kappa_1(p) e_1, \quad A_p e_2 = \kappa_2(p) e_2.$$

Los autovalores $\kappa_1(p), \kappa_2(p) \in \mathbb{R}$ de A_p se llaman las *curvaturas principales* de S en p . Cualquier autovector de A_p se denomina *dirección principal* de S en p . Así, si $\kappa_1(p) \neq \kappa_2(p)$, las direcciones principales son los múltiplos no nulos de e_1 y e_2 , mientras que si $\kappa_1(p) = \kappa_2(p)$ todo vector no nulo de $T_p S$ es dirección principal. Se observa que si cambiamos el signo del campo normal N , entonces A_p cambia de signo, y por tanto las curvaturas principales también.

Si realizamos la diagonalización anterior en todo punto p de un abierto de S donde tengamos bien definido el campo diferenciable normal unitario N , obtendremos funciones

continuas κ_1 y κ_2 definidas en ese abierto, denominadas funciones de curvatura principal. Además, allí donde $\kappa_1 \neq \kappa_2$, ambas son funciones diferenciables. Una *línea de curvatura* es una curva diferenciable $\alpha: I \rightarrow S$ tal que $\alpha'(t)$ es dirección principal de S para todo $t \in I$, es decir, $A_{\alpha(t)}\alpha'(t) = \lambda(t)\alpha'(t)$, para todo $t \in I$ y cierta función curvatura principal $\lambda: I \rightarrow \mathbb{R}$.

Una *dirección asintótica* de S en p es un vector $x \in T_pS$ no nulo tal que $\mathbb{I}_p(x, x) = 0$. Una *línea asintótica* de S es una curva diferenciable $\alpha: I \rightarrow S$ tal que $\alpha'(t)$ es dirección asintótica para todo $t \in I$, es decir, $\mathbb{I}(\alpha', \alpha') = 0$.

La *curvatura de Gauss* de S en p se define como el número real

$$K(p) := \det A_p, \quad \text{o equivalentemente} \quad K(p) = \kappa_1(p)\kappa_2(p),$$

mientras que la *curvatura media* de S en p es el número real

$$H(p) := \frac{1}{2} \operatorname{tr} A_p, \quad \text{o equivalentemente} \quad H(p) = \frac{1}{2}(\kappa_1(p) + \kappa_2(p)).$$

Como A_p es un endomorfismo lineal, ambos conceptos están bien definidos (el determinante y la traza de una matriz, al igual que sus autovalores, permanecen invariantes bajo cambio de base). Se observa que la curvatura de Gauss permanece invariante si cambiamos el signo del campo normal N , mientras que la curvatura media cambia de signo. Permitiendo variar $p \in S$, tanto K como H dan lugar a funciones diferenciables definidas allá donde esté definido el campo normal unitario N . Las superficies con H idénticamente nula, como por ejemplo el plano, el helicoido o el catenoide, reciben el nombre de *superficies minimales*.

En coordenadas locales, las curvaturas de Gauss y media se pueden calcular en términos de los coeficientes de la primera y la segunda formas fundamentales. Así, a partir de (4) es fácil deducir que:

$$K = \frac{eg - f^2}{EG - F^2}, \quad H = \frac{1}{2} \frac{eG + gE - 2fF}{EG - F^2}.$$

Un punto p de una superficie es exactamente de uno de los siguientes cuatro tipos:

1. *elíptico*, si $K(p) > 0$,
2. *hiperbólico*, si $K(p) < 0$,
3. *parabólico*, si $K(p) = 0$ pero $A_p \neq 0$, i.e. cuando una de las dos curvaturas principales es 0 pero la otra no,
4. *plano*, si $A_p = 0$, i.e. si $\kappa_1(p) = \kappa_2(p) = 0$.

Los puntos elípticos e hiperbólicos poseen la siguiente interpretación geométrica: p es elíptico si hay un entorno abierto de p en S que queda a un lado del plano tangente afín a S en p (como por ejemplo los puntos de una esfera, elipsoide o paraboloido de una hoja), mientras que p es hiperbólico si cualquier entorno abierto de p en S contiene puntos a ambos lados del plano tangente afín a S en p (como por ejemplo los puntos de un catenoide o un helicoido).

Además, un punto p se dice *umbilical* si $\kappa_1(p) = \kappa_2(p)$. Una superficie se dice *totalmente umbilical* si todos sus puntos son umbilicales. Se puede probar que una superficie regular (orientable, conexa) es totalmente umbilical si y solo si es un abierto de un plano o de una esfera.

2.6. La aceleración de una curva: curvaturas geodésica y normal. Sea $\alpha: I \rightarrow S$ una curva regular en una superficie regular S de \mathbb{R}^3 con campo normal unitario N . Supongamos que α está parametrizada por longitud de arco. Por estar la traza de α contenida en S y por la definición de plano tangente, el vector velocidad de α cumple que $\alpha'(s) \in T_{\alpha(s)}S$, para todo $s \in I$. Sin embargo, el vector aceleración $\alpha''(s)$ no tiene por qué ser ni tangente ni normal a S . Puesto que, para cada $p \in S$, podemos descomponer \mathbb{R}^3 como la suma directa ortogonal de espacios vectoriales $T_pS \oplus \text{span}\{N(p)\}$, podemos considerar las componentes (o proyecciones) tangencial $(\alpha'')^\top$ y normal $(\alpha'')^\perp$ de α'' , de forma que

$$\alpha''(s) = \alpha''(s)^\top + \alpha''(s)^\perp, \quad s \in I,$$

donde $\alpha''(s)^\top \in T_{\alpha(s)}S$ y $\alpha''(s)^\perp \in \text{span}\{N(\alpha(s))\}$.

Consideremos la componente tangencial $(\alpha'')^\top$, que define un campo de vectores (tangente a S) a lo largo de α . Puesto que α está parametrizada por arco, tenemos que $\langle \alpha'', \alpha' \rangle = 0$ y, por tanto, $\langle (\alpha'')^\top, \alpha' \rangle = 0$. Ya que $(\alpha'')^\top$ es tangente a S en todo punto, se tiene que $\langle (\alpha'')^\top, N \circ \alpha \rangle = 0$. Por lo tanto, $\alpha''(s)^\top$ debe ser proporcional a

$$J\alpha'(s) := N(\alpha(s)) \times \alpha'(s),$$

para todo $s \in I$. En otras palabras, $\alpha''(s)^\top$ es proporcional al segundo vector del denominado *triedro de Darboux* de α en s , que es la base ortonormal positivamente orientada de \mathbb{R}^3 dada por

$$\{\alpha'(s), J\alpha'(s), N(\alpha(s))\}.$$

A la correspondiente constante de proporcionalidad se le denomina *curvatura geodésica* de α en s :

$$k_{g,\alpha}(s) := \langle \alpha''(s), J\alpha'(s) \rangle = \langle \alpha''(s), N(\alpha(s)) \times \alpha'(s) \rangle, \quad s \in I.$$

Usando la definición de curvatura k_α de α , se tiene que

$$k_{g,\alpha} = k_\alpha \langle \mathbf{n}_\alpha, J\alpha' \rangle = k_\alpha \langle \mathbf{n}_\alpha, (N \circ \alpha) \times \alpha' \rangle,$$

donde \mathbf{n}_α es el campo normal asociado a la curva espacial α (es decir, el segundo elemento del triedro de Frenet $\{\mathbf{t}_\alpha, \mathbf{n}_\alpha, \mathbf{b}_\alpha\}$).

Por otro lado, es claro que la componente normal $(\alpha'')^\perp$ de la aceleración es un campo de vectores (normal a S) definido a lo largo de α que viene dado por $\alpha''(s)^\perp = \langle \alpha''(s), N(\alpha(s)) \rangle N(\alpha(s))$. Se define la *curvatura normal* de α en s como el coeficiente en la expresión previa, es decir:

$$k_{n,\alpha}(s) = \langle \alpha''(s), N(\alpha(s)) \rangle, \quad s \in I.$$

Usando de nuevo que $\alpha'' = k_\alpha \mathbf{n}_\alpha$, se tiene que

$$(5) \quad k_{n,\alpha} = k_\alpha \langle \mathbf{n}_\alpha, N \circ \alpha \rangle.$$

Así pues, las curvaturas geodésica y normal de una curva parametrizada por arco en una superficie son las componentes (escalares) tangencial y normal de la aceleración, respectivamente. Dado que el triedro de Darboux es base ortonormal se deduce que

$$\alpha'' = k_{g,\alpha} J\alpha' + k_{n,\alpha} (N \circ \alpha),$$

y por tanto, tomando normas, $k_\alpha^2 = k_{g,\alpha}^2 + k_{n,\alpha}^2$.

Si $\alpha: I \rightarrow S$ simplemente es regular, pero no necesariamente parametrizada por arco, se definen sus curvaturas geodésica y normal como las curvaturas geodésica y normal de una reparametrización por longitud de arco que preserve la orientación de la curva. Así, se prueba que

$$k_{g,\alpha} = k_\alpha \langle \mathbf{n}_\alpha, (N \circ \alpha) \times \mathbf{t}_\alpha \rangle = \frac{1}{|\alpha'|^3} \langle \alpha'', (N \circ \alpha) \times \alpha' \rangle,$$

$$k_{n,\alpha} = k_\alpha \langle \mathbf{n}_\alpha, N \circ \alpha \rangle = \frac{1}{|\alpha'|^2} \langle \alpha'', N \circ \alpha \rangle.$$

2.7. Curvatura normal y segunda forma fundamental. Sea S una superficie regular en \mathbb{R}^3 con campo normal unitario N . Si $\alpha: I \rightarrow S$ es una curva diferenciable en S , entonces, derivando la relación $\langle \alpha'(t), N(\alpha(t)) \rangle = 0$ se obtiene

$$\mathbb{I}_{\alpha(t)}(\alpha'(t), \alpha'(t)) = \langle \alpha''(t), N(\alpha(t)) \rangle, \quad t \in I.$$

En particular, si α es regular, se tiene la siguiente relación entre la curvatura normal de α y la segunda forma fundamental de S :

$$k_{n,\alpha} = k_\alpha \langle \mathbf{n}_\alpha, N \circ \alpha \rangle = \mathbb{I}(\mathbf{t}_\alpha, \mathbf{t}_\alpha).$$

Deducimos que cualesquiera dos curvas regulares que pasen por un punto p de S con vectores velocidad colineales tienen la misma curvatura normal en ese punto. Así pues, es posible definir la *curvatura normal* $k_n(p, x)$ de S en p en la dirección de un vector unitario tangente $x \in T_p S$ mediante

$$k_n(p, x) := \mathbb{I}_p(x, x),$$

o, equivalentemente, como la curvatura normal $k_{n,\alpha}(0)$ en $t = 0$ de una curva regular cualquiera $\alpha: (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow S$ tal que $\alpha(0) = p$ y $\alpha'(0) = x$. Observemos que tenemos un concepto de curvatura normal $k_{n,\alpha}: I \rightarrow \mathbb{R}$ asociado a una curva regular $\alpha: I \rightarrow S$ en una superficie, y también un concepto de curvatura normal $k_n(p, x) \in \mathbb{R}$ asociado a una dirección unitaria tangente $x \in T_p S$ a una superficie S ; ambos conceptos son formalmente distintos, pero están íntimamente relacionados, como acabamos de ver.

Podemos usar estas relaciones para dar una interpretación geométrica útil de la curvatura normal. Así, sea $p \in S$ y $x \in T_p S$ unitario. Consideremos el plano afín $\Pi_x = p + \text{span}\{x, N(p)\}$. Es posible probar que dicho plano Π_x interseca a S (al menos cerca de p) en una curva que puede ser parametrizada de modo regular y, por tanto, por parámetro longitud de arco. A dicha curva parametrizada se le llama *sección normal* de S por p en la dirección de x . Si denotamos por α dicha curva, y la suponemos definida en $(-\epsilon, \epsilon)$ de modo que $\alpha(0) = p$ y $\alpha'(0) = x$, entonces se sigue de (5) que la curvatura normal $k_{n,\alpha}(0) = k_n(p, x)$ coincide exactamente con la curvatura con signo de α en 0, vista como curva plana dentro del plano Π_x .

En particular, si S contiene un segmento de recta pasando por p y con dirección x , entonces $\mathbb{I}_p(x, x) = k_n(p, x) = 0$, por lo que x es una dirección asintótica (sin embargo, el recíproco es falso: las líneas asintóticas no tienen por qué ser segmentos de rectas).

Otra propiedad importante es que las curvaturas principales de una superficie son las curvaturas normales mínima y máxima por cada punto. De modo más preciso, si $p \in S$, sin

pérdida de generalidad podemos suponer que las curvaturas principales de S en p satisfacen $\kappa_1(p) \leq \kappa_2(p)$. Entonces se cumple que

$$\kappa_1(p) \leq k_n(p, x) = \mathbb{I}_p(x, x) \leq \kappa_2(p), \quad \text{para todo } x \in T_p S, \|x\| = 1.$$

En particular, un vector $x \in T_p S$ es una dirección principal de S si y solo si la sección normal $\Pi_x \cap S$ tiene curvatura normal $\kappa_1(p)$ o $\kappa_2(p)$. Más aún, si $\{e_1, e_2\}$ es una base ortonormal de $T_p S$ de direcciones principales, con $A_p e_1 = \kappa_1(p)e_1$ y $A_p e_2 = \kappa_2(p)e_2$, y suponiendo que $\kappa_1(p) \leq \kappa_2(p)$, entonces

$$k_n(p, x_\theta) = \kappa_1(p) \cos^2 \theta + \kappa_2(p) \sin^2 \theta,$$

donde $x_\theta \in T_p S$ es un vector unitario que forma un ángulo θ con e_1 , i.e. $\cos \theta = \langle e_1, x_\theta \rangle$.

2.8. El teorema Egregium de Gauss. Si bien la curvatura de Gauss de una superficie se ha definido en términos de conceptos extrínsecos (como el determinante del operador de forma, que es esencialmente la diferencial de un campo normal), el teorema Egregium de Gauss afirma que la curvatura de Gauss es un invariante intrínseco. Esto quiere decir que se preserva por isometrías locales.

De modo más preciso, el teorema afirma que si $f: S_1 \rightarrow S_2$ es una isometría local entre superficies regulares en \mathbb{R}^3 , y K_1 y K_2 son las curvaturas de Gauss de S_1 y S_2 , respectivamente, entonces $K_1(p) = K_2(f(p))$ para todo $p \in S_1$.

No se puede decir lo mismo de la curvatura media, de la segunda forma fundamental, del operador de forma o de las curvaturas principales, como el ejemplo de la isometría local entre plano y cilindro nos muestra. Así, mientras que la curvatura de Gauss es un invariante intrínseco, estos otros conceptos son solamente invariantes extrínsecos: se preservan por movimientos rígidos de \mathbb{R}^3 , pero en general no por isometrías entre superficies.

2.9. Las ecuaciones de compatibilidad y teorema fundamental de superficies. Sea S una superficie regular en \mathbb{R}^3 y $\mathbf{x}: U \rightarrow S$ una parametrización de S . Cada una de las derivadas segundas de \mathbf{x} se puede escribir como combinación lineal de $\{\mathbf{x}_u, \mathbf{x}_v, N \circ \mathbf{x}\}$, puesto que estos forman una base de \mathbb{R}^3 . Así, existen funciones $\Gamma_{ij}^k: U \rightarrow \mathbb{R}$ tales que

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{uu} &= \Gamma_{11}^1 \mathbf{x}_u + \Gamma_{11}^2 \mathbf{x}_v + e N \circ \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_{uv} &= \Gamma_{12}^1 \mathbf{x}_u + \Gamma_{12}^2 \mathbf{x}_v + f N \circ \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_{vv} &= \Gamma_{22}^1 \mathbf{x}_u + \Gamma_{22}^2 \mathbf{x}_v + g N \circ \mathbf{x}, \end{aligned}$$

donde e, f, g son los coeficientes de la segunda forma fundamental. A los coeficientes Γ_{ij}^k se les llama *símbolos de Christoffel*.

El teorema de Schwarz de las derivadas cruzadas aplicado a las derivadas terceras de \mathbf{x} (por ejemplo $(\mathbf{x}_{uu})_v = (\mathbf{x}_{uv})_u$) da lugar a ciertas relaciones entre los símbolos de Christoffel, los coeficientes de la primera y segunda forma fundamentales, y las derivadas primeras de todos estos. Estas relaciones se reducen a tres ecuaciones que se denominan *ecuaciones de compatibilidad*: una de ellas se llama *ecuación de Gauss* y las otras dos *ecuaciones de Codazzi-Mainardi*. Toda parametrización de una superficie regular en \mathbb{R}^3 satisface esas tres ecuaciones.

El teorema de Bonnet, o teorema fundamental de la teoría local de superficies en \mathbb{R}^3 , esencialmente afirma que dichas ecuaciones son suficientes para la existencia de una superficie regular, y que además la primera y la segunda forma fundamentales determinan la superficie salvo movimiento rígido. De modo más preciso, si E, F, G, e, f, g son funciones diferenciables sobre un abierto V de \mathbb{R}^2 verificando las ecuaciones de compatibilidad y las desigualdades $E > 0$, $G > 0$, $EG - F^2 > 0$, entonces existen un abierto $U \subset V$ y un difeomorfismo $\mathbf{x}: U \rightarrow S \subset \mathbb{R}^3$ donde $S = \mathbf{x}(U)$ es una superficie regular, parametrizada por \mathbf{x} y tal que los coeficientes de la primera y la segunda formas fundamentales son E, F, G y e, f, g , respectivamente. Además, si U es conexo e $\mathbf{y}: U \rightarrow S' \subset \mathbb{R}^3$ es una parametrización de otra superficie $S' = \mathbf{y}(U)$ cuyos coeficientes de la primera y segunda forma fundamentales son E, F, G y e, f, g , respectivamente, entonces existe un movimiento rígido $\varphi: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ tal que $\varphi(S) = S'$.

3. TRANSPORTE PARALELO Y GEODÉSICAS

3.1. Campos de vectores a lo largo de curvas. Sea S una superficie regular en \mathbb{R}^3 . Un *campo de vectores* en un abierto V de S es una aplicación $X: V \rightarrow \mathbb{R}^3$, que visualizamos de forma que en cada punto $p \in V$ colocamos un vector de \mathbb{R}^3 . Dicho campo se dice *tangente* si tal vector es tangente en todo punto, es decir, si $X(p) \in T_p S$, para todo $p \in S$; y se dice *diferenciable* si X es una aplicación diferenciable. Los campos coordenados de una parametrización son ejemplos de campos diferenciables tangentes.

Nos interesará aquí restringir nuestra atención a campos definidos exclusivamente sobre curvas en superficies, en vez de sobre abiertos en superficies. Así, si $\alpha: I \rightarrow S$ es una curva diferenciable en S , un *campo de vectores* a lo largo de α es una aplicación $X: I \rightarrow \mathbb{R}^3$. La visualizamos de forma que en cada punto de la curva $\alpha(t) \in S$ ponemos un vector de \mathbb{R}^3 . Hay que tener en cuenta que, si la curva pasa dos o más veces por un mismo punto en instantes diferentes, el campo puede tomar valores diferentes en cada uno de tales instantes; es decir, si $\alpha(t_0) = \alpha(t_1)$ para $t_0, t_1 \in I$, puede suceder que $X(t_0) \neq X(t_1)$. El campo X se dice *tangente* si $X(t) \in T_{\alpha(t)} S$, para todo $t \in I$, y se dice *diferenciable* si X es una aplicación diferenciable. Denotaremos por $\mathfrak{X}(\alpha)$ el conjunto (de hecho, espacio vectorial) de campos de vectores diferenciables tangentes a lo largo de α .

Sea S una superficie regular en \mathbb{R}^3 con campo normal unitario N . Recuerda que N puede solo estar definido en un abierto de S , y que si se puede definir globalmente en S eso significa que S es orientable. Dado un campo de vectores X a lo largo de una curva $\alpha: I \rightarrow S$, denotaremos por X^\top y X^\perp los campos de vectores componente tangente y componente normal de X , respectivamente. Es decir,

$$X(t) = X(t)^\top + X(t)^\perp = X(t)^\top + \langle X(t), N(\alpha(t)) \rangle N(\alpha(t)), \quad t \in I,$$

donde $X(t)^\top \in T_{\alpha(t)} S$ es tangente a S en $\alpha(t)$, y $X(t)^\perp$ es normal a S en $\alpha(t)$ (i.e. colineal a $N(\alpha(t))$), para todo $t \in I$.

Observemos que, si $\alpha: I \rightarrow S$ es una curva diferenciable, entonces $\alpha' \in \mathfrak{X}(\alpha)$, es decir, α' es un campo de vectores diferenciable tangente a lo largo de α . Sin embargo, la aceleración α'' es un campo de vectores diferenciable, pero no necesariamente tangente.

El campo $J\alpha'$ dado por

$$J\alpha'(t) = N(\alpha(t)) \times \alpha'(t), \quad t \in I,$$

es un campo de vectores diferenciable tangente, $J\alpha' \in \mathfrak{X}(\alpha')$. Notemos que si α es regular, $\{\alpha'(t), J\alpha'(t)\}$ es una base de $T_{\alpha(t)}S$, por lo que todo $X \in \mathfrak{X}(\alpha)$ se puede escribir como combinación lineal de α' y $J\alpha'$, esto es, $X = f\alpha' + gJ\alpha'$, para ciertas funciones diferenciables $f, g: I \rightarrow \mathbb{R}$.

Observemos también que si X es cualquier campo tangente en $\mathfrak{X}(\alpha)$, podemos considerar su derivada X' , que es de nuevo un campo diferenciable a lo largo de α , pero no necesariamente tangente.

Finalmente, si partimos de un campo de vectores Y definido en un abierto V de S , y α es una curva con imagen en V , podemos considerar el campo de vectores $X = Y \circ \alpha$ a lo largo de α . Es claro que si Y es diferenciable (resp. tangente), entonces X es diferenciable (resp. tangente).

3.2. Derivada covariante. Sea $X \in \mathfrak{X}(\alpha)$ un campo de vectores diferenciable tangente a lo largo de una curva diferenciable $\alpha: I \rightarrow S$ en una superficie regular S de \mathbb{R}^3 . Se define la *derivada covariante* (o *intrínseca*) de X como la componente tangente de X' , es decir,

$$\frac{DX}{dt}(t) := X'(t)^\top = X'(t) - \langle X(t), N(\alpha(t)) \rangle N(\alpha(t)), \quad t \in I.$$

Es claro que DX/dt es un campo diferenciable tangente a lo largo de α , es decir, $DX/dt \in \mathfrak{X}(\alpha)$. Además, es inmediato comprobar que DX/dt no depende del campo normal unitario escogido, y se puede probar que, de hecho, solo depende de los símbolos de Christoffel de S , que a su vez solo dependen de los coeficientes de la primera forma fundamental y sus derivadas. Por tanto, la derivada covariante de un campo de vectores es un objeto intrínseco (es decir, su valor se preserva por isometrías locales).

El espacio vectorial $\mathfrak{X}(\alpha)$ es de hecho un módulo sobre el anillo de funciones diferenciables $C^\infty(I, \mathbb{R})$, lo cual quiere decir que si $X, Y \in \mathfrak{X}(\alpha)$ y $f \in C^\infty(I, \mathbb{R})$, entonces $X + Y \in \mathfrak{X}(\alpha)$ y $fX \in \mathfrak{X}(\alpha)$. Además, el operador derivada covariante

$$\frac{D}{dt}: \mathfrak{X}(\alpha) \rightarrow \mathfrak{X}(\alpha), \quad \frac{D}{dt}X := \frac{DX}{dt},$$

satisface:

- (a) $\frac{D}{dt}(aX + bY) = a\frac{DX}{dt} + b\frac{DY}{dt}$, para $X, Y \in \mathfrak{X}(\alpha)$, $a, b \in \mathbb{R}$ (\mathbb{R} -linealidad),
- (b) $\frac{D}{dt}(fX) = f'X + f\frac{DX}{dt}$, para $X \in \mathfrak{X}(\alpha)$ y $f \in C^\infty(I, \mathbb{R})$ (regla de Leibniz),
- (c) $\langle X, Y \rangle' = \left\langle \frac{DX}{dt}, Y \right\rangle + \left\langle X, \frac{DY}{dt} \right\rangle$, con $X, Y \in \mathfrak{X}(\alpha)$ (derivada del producto escalar).

La derivada covariante proporciona una forma intrínseca de derivar campos de vectores tangentes a lo largo de curvas en una superficie, olvidándose de cómo varían dichos campos en direcciones normales a la superficie.

3.3. Campos de vectores paralelos y transporte paralelo. Un campo de vectores diferenciable tangente $X \in \mathfrak{X}(\alpha)$ a lo largo de una curva $\alpha: I \rightarrow S$ se dice *paralelo* a lo largo de α si su derivada covariante se anula idénticamente, i.e.

$$\frac{DX}{dt}(t) = 0, \quad \text{para todo } t \in I.$$

Obsérvese que si S es un plano en \mathbb{R}^3 y α una curva en S , entonces un campo X a lo largo de α es paralelo con la definición anterior si y solo si X es constante. Es decir, el vector $X(t)$ es el mismo para todos los puntos de la curva, lo cual lo visualizamos colocando vectores paralelos (en el sentido estándar) en cada punto de la curva. Así pues, el concepto de campo paralelo generaliza la idea de vectores paralelos de la geometría plana al contexto de geometría de superficies.

Si $X, Y \in \mathfrak{X}(\alpha)$ son campos paralelos y $a, b \in \mathbb{R}$, entonces $aX + bY$ es un campo paralelo, y $\langle X, Y \rangle$ (y por tanto $\|X\|$ y el ángulo entre X e Y) es constante (i.e. no depende del instante $t \in I$).

Dada una curva diferenciable $\alpha: I \rightarrow S$ en una superficie regular S , y dados $t_0 \in I$ y $X_0 \in T_{\alpha(t_0)}S$, existe un único campo de vectores X paralelo a lo largo de α tal que $X(t_0) = X_0$. Este teorema de existencia y unicidad se sigue del hecho que la condición $DX/dt = 0$ se traduce, en coordenadas locales, en una EDO de primer orden lineal (cuyos coeficientes, como ya comentamos, dependen de los coeficientes de la primera forma fundamental de S y sus derivadas), y por tanto es aplicable el teorema de existencia y unicidad para problemas de valor inicial de EDOs lineales.

El resultado anterior nos conduce al concepto de transporte paralelo, que definimos a continuación. Así, si $\alpha: I \rightarrow S$ es una curva diferenciable en S , $t_0, t_1 \in I$, y $X_0 \in T_{\alpha(t_0)}S$ es un vector tangente a S en $\alpha(t_0)$, se define el *transporte paralelo* de X_0 a lo largo de α en el instante t_1 (o en el punto $\alpha(t_1)$) como el vector tangente $X(t_1) \in T_{\alpha(t_1)}S$, donde X es el único campo paralelo a lo largo de α tal que $X(t_0) = X_0$. Es decir, nos dan una curva en una superficie, y un vector tangente a la superficie en un punto de la curva, calculamos el único campo paralelo con esa condición inicial, y evaluamos en otro punto de la curva.

El transporte paralelo determina, para cada curva $\alpha: I \rightarrow S$ y cada par de instantes $t_0, t_1 \in I$, una aplicación

$$P_{t_0}^{t_1}(\alpha): T_{\alpha(t_0)}S \rightarrow T_{\alpha(t_1)}S, \quad P_{t_0}^{t_1}(\alpha)X_0 = X(t_1).$$

Esta aplicación es una isometría lineal entre los espacios vectoriales $T_{\alpha(t_0)}S$ y $T_{\alpha(t_1)}S$ dotados del producto escalar dado por la primera forma fundamental en cada uno de ellos.

Si α es una curva regular, entonces el transporte paralelo entre dos puntos de la imagen α no depende de la parametrización de α escogida. Además, si S_1 y S_2 son dos superficies regulares que son tangentes a lo largo de una curva diferenciable α , el transporte paralelo a lo largo de α es el mismo para ambas superficies.

3.4. Geodésicas. El concepto de geodésica generaliza la noción de trayectoria rectilínea de velocidad constante (o movimiento rectilíneo uniforme, en el enunciado de la primera ley de Newton), propia de la geometría euclídea, al ámbito de la geometría de superficies. Así, una geodésica representa una trayectoria sin aceleración intrínseca.

Sea $\gamma: I \rightarrow S$ una curva diferenciable en una superficie regular S de \mathbb{R}^3 . Decimos que γ es una *geodésica* en S si la componente tangencial de su aceleración es nula en todo punto, i.e. $(\gamma''(t))^\top = 0$, para todo $t \in I$. Esto equivale a que el campo velocidad γ' sea paralelo a lo largo de γ , es decir, a que $D\gamma'/dt = 0$.

La rapidez $\|\gamma'\|$ de una geodésica γ es constante, i.e. $\|\gamma'(t)\| = c \in \mathbb{R}$ para todo $t \in I$, al ser γ' un campo paralelo. Si $c \neq 0$, γ es por tanto regular, y parametrizada por parámetro proporcional a la longitud de arco. Si $c = 0$, entonces γ es una curva constante. De todo esto se deduce que en el concepto de geodésica no solamente entra una información geométrica sobre la traza de la curva, sino sobre cómo se recorre. De hecho, si γ es una geodésica, cualquier otra geodésica $\tilde{\gamma}$ con la misma traza que γ estará parametrizada mediante $\tilde{\gamma}(t) = \gamma(at + b)$ para ciertos $a, b \in \mathbb{R}$. A veces se comete un abuso de lenguaje y se habla de geodésicas refiriéndose a sus trazas, sin mencionar cómo están parametrizadas, pero siempre se debe entender entonces que deben ser parametrizadas por parámetro proporcional a arco.

Dejando de lado las geodésicas triviales dadas por curvas constantes, se prueba que las geodésicas de un plano en \mathbb{R}^3 son trozos de rectas (parametrizadas por parámetro proporcional a arco). Las geodésicas de una esfera son trozos de circunferencias máximas.

Las geodésicas se conservan por isometrías locales, ya que solo dependen de la derivada covariante y, por tanto, de los coeficientes de la primera forma fundamental y sus derivadas. Así pues, el concepto de geodésica es un concepto intrínseco. Esta idea se puede usar para hallar, por ejemplo, las geodésicas de un cilindro o un cono, calculando la imagen de segmentos de recta vía isometrías locales con el plano. Sin embargo, una geodésica puede admitir autointersecciones (por ejemplo, en un cono).

Dada una superficie regular S en \mathbb{R}^3 , un punto $p \in S$ y un vector tangente $v \in T_p S$, se prueba que existe una única geodésica $\gamma_v: I_v \rightarrow S$, con I_v intervalo abierto de \mathbb{R} , tal que $0 \in I_v$, $\gamma_v(0) = p$ y $\gamma'_v(0) = v$, y I_v es maximal (en el sentido que si $\alpha: I \rightarrow S$ es una geodésica en S con $\alpha(0) = p$ y $\alpha'(0) = v$, entonces $I \subset I_v$ y $\alpha \equiv \gamma_v|_I$, $t \in I$). Así pues, dadas condiciones iniciales (punto y vector tangente en ese punto) existe una única geodésica con dichas condiciones iniciales e intervalo maximal de definición. En particular, dos geodésicas en una superficie con las mismas condiciones iniciales coinciden localmente.

De nuevo, este resultado de existencia y unicidad se sigue del teorema de existencia y unicidad para problemas de valor inicial de EDOs. En este caso, la condición de ser geodésica se traduce en una EDO de segundo orden (por eso se necesitan dos condiciones iniciales, punto y vector). Esta EDO es no lineal en general, lo que se traduce en que sus soluciones pueden no estar definidas en todo \mathbb{R} (a diferencia de lo que sucedía con los campos paralelos, que estaban definidos en todo el intervalo de definición de la curva). Si una superficie es tal que sus geodésicas se pueden definir en todo \mathbb{R} (es decir, si el intervalo maximal I_v definido antes es $I_v = \mathbb{R}$, para todo v tangente a la superficie), entonces la superficie se llama *geodésicamente completa*. Es claro que un plano, una esfera o un cilindro son superficies geodésicamente completas; pero si a cualquiera de ellas le sacamos algún punto, dejan de serlo.

Recordemos que en la Subsección 2.6 definimos la curvatura geodésica $k_{g,\alpha}$ de una curva regular α en una superficie regular S mediante $k_{g,\alpha} = \langle \alpha'', J\alpha' \rangle / |\alpha'|^3$. Pues bien, se prueba que una curva regular α se puede reparametrizar como una geodésica si y solo si

su curvatura geodésica se anula idénticamente, $k_{g,\alpha} = 0$. En particular, si α está parametrizada por parámetro longitud de arco o proporcional a él, α es geodésica si y solo si $k_{g,\alpha} = \langle \alpha'', J\alpha' \rangle = 0$.

Las geodésicas no solamente son importantes como curvas de aceleración intrínseca nula, sino debido a sus propiedades minimizantes (de la longitud). Así, dado cualquier punto $p \in S$ de una superficie regular, existe un entorno abierto V de p en S tal que para todo $q \in V$, existe una única geodésica γ con $\gamma(0) = p$ y $\gamma(1) = q$ tal que cualquier segmento de curva $\alpha: [a, b] \rightarrow S$ con $\alpha(a) = p$ y $\alpha(b) = q$ tiene longitud mayor o igual que γ , i.e. $L_0^1(\gamma) \leq L_a^b(\alpha)$; además, se cumple $L_0^1(\gamma) = L_a^b(\alpha)$ si y solo si α es una reparametrización de γ .

Así pues, las geodésicas minimizan localmente la longitud de curvas. Sin embargo, no es verdad en general que las geodésicas minimicen globalmente la longitud de curvas entre dos puntos fijados. Por ejemplo, en un cilindro, si tomamos dos puntos en la misma generatriz, el segmento de generatriz que los une sí minimiza la longitud de curvas entre ambos puntos, pero existen (infinitas) hélices en el cilindro, uniendo ambos puntos, que son geodésicas del cilindro pero cuya longitud es mayor que la longitud del segmento de generatriz.

Lo que sí es cierto es que si un segmento de curva $\gamma: [a, b] \rightarrow S$ en una superficie minimiza la longitud de curvas entre sus extremos (es decir, $L_a^b(\gamma) \leq L_c^d(\alpha)$, para todo segmento de curva $\alpha: [c, d] \rightarrow S$ con $\alpha(c) = \gamma(a)$ y $\alpha(d) = \gamma(b)$), entonces γ es un segmento de geodésica.

4. EL TEOREMA DE GAUSS-BONNET

En el área de la Geometría Diferencial abundan ejemplos de resultados que vinculan propiedades geométricas con otras de carácter topológico. Un ejemplo paradigmático de esta relación es el teorema de Gauss-Bonnet que, en su versión más simplificada, relaciona la integral de la curvatura de Gauss (invariante geométrico) de una superficie compacta con la característica de Euler (invariante topológico) de la misma.

4.1. Versión global del teorema de Gauss-Bonnet. Sea S una superficie regular en \mathbb{R}^3 , orientada por un campo normal unitario definido globalmente en S . Consideramos en S una región R delimitada por polígonos curvados $\Gamma_1, \dots, \Gamma_n$, que suponemos parametrizados de modo estén positivamente orientados. Sean $\theta_1, \dots, \theta_m$ los ángulos externos de los polígonos Γ_i . Entonces el teorema de Gauss-Bonnet afirma que se tiene la relación

$$\int_R K dA + \sum_{i=1}^n \int_{\Gamma_i} k_{g,\Gamma_i} ds + \sum_{j=1}^m \theta_j = 2\pi\chi(R).$$

Explicaremos cada uno de los términos de esta ecuación.

En primer lugar, K es la curvatura de Gauss de S , que aparece integrada en la región R . Para integrar una función (como K) sobre una región de una superficie, se descompone R en subregiones de modo que cada una esté contenida en un abierto de una parametrización, y se integra la función a lo largo de la correspondiente región del plano \mathbb{R}^2 , sumando el valor de cada subregión. En particular, si R está contenida en un abierto $\mathbf{x}(U) \subset S$ asociado a una parametrización \mathbf{x} , la integral en R de una función $f: S \rightarrow \mathbb{R}$ se reduce, por definición,

a la siguiente integral en $\mathbf{x}^{-1}(R) \subset U \subset \mathbb{R}^2$:

$$\int_R f dA := \int_{\mathbf{x}^{-1}(R)} (f \circ \mathbf{x})(u, v) \sqrt{EG - F^2}(u, v) du dv,$$

donde E, F, G son los coeficientes de la primera forma fundamental de la parametrización \mathbf{x} .

En el segundo sumando de la fórmula de Gauss-Bonnet, la función k_{g, Γ_i} es la curvatura geodésica de Γ_i . Cada Γ_i es una curva cerrada diferenciable por trozos en S . Esto quiere decir que Γ_i es la traza de un camino $\alpha_i: [a_i, b_i] \rightarrow S$ tal que $\alpha_i|_{[t_{i,k}, t_{i,k+1}]}$ es una curva regular y $\alpha_i(a_i) = \alpha_i(b_i)$, donde $a_i = t_{i,0} < t_{i,1} < \dots < t_{i,r_i-1} < t_{i,r_i} = b_i$. Además, como ya indicamos, cada Γ_i está positivamente orientada, es decir, la curva parametrizada α_i asociada satisface que $J\alpha_i'$ apunta hacia el interior de la región R . Finalmente, cada integral $\int_{\Gamma_i} k_{g, \Gamma_i} ds$ se calcula integrando la curvatura geodésica de cada $\alpha_i|_{[t_{i,k}, t_{i,k+1}]}$, y sumando.

El tercer sumando de la fórmula es la suma de los ángulos externos de los polígonos Γ_i . Con la notación del párrafo anterior, se trata de cada uno de los ángulos que forman las derivadas laterales $\alpha_i'(t_{i,k}^-)$ con $\alpha_i'(t_{i,k}^+)$, y $\alpha_i'(b_i^-)$ con $\alpha_i'(a_i^+)$.

Finalmente, el término de la derecha del signo igual en la fórmula de Gauss-Bonnet es el producto de 2π por la característica de Euler $\chi(R)$ de la región R . La *característica de Euler* es un invariante topológico que se calcula como $\chi(R) = V - A + C$, donde V, A y C son el número de vértices, aristas y caras, respectivamente, de una triangularización cualquiera de la región R . Es fácil calcular, por ejemplo, que la característica de Euler de una región triangular, es decir, delimitada por un polígono Γ de tres vértices, es $3 - 3 + 1 = 1$; ya que la característica de Euler es invariante por homeomorfismos, se tiene que la característica de Euler de una región homeomorfa a un disco es también 1. También es fácil ver que la característica de Euler de una esfera es $\chi(\mathbb{S}^2) = 2$, mientras que la de una región anular (o un cilindro), al igual que la de un toro, es 0.

4.2. Algunas consecuencias. Si S es una superficie regular compacta podemos considerar como región $R = S$. Dicha región no tiene borde, por lo que la fórmula de Gauss-Bonnet se reduce a

$$\int_S K dA = 2\pi\chi(S).$$

Así, por ejemplo, cualquier superficie regular S homeomorfa a la esfera \mathbb{S}^2 satisface que la integral de su curvatura de Gauss es 4π .

Un resultado de teoría topológica de superficies asegura que la característica de Euler de cualquier superficie conexa, orientable y compacta toma uno de los siguientes valores: $2, 0, -2, -4, -6, \dots$. Además, dos de estas superficies son homeomorfas si y solo si tienen la misma característica de Euler. Así pues, si una superficie regular S tiene curvatura de Gauss positiva en todo punto, $K > 0$, entonces el teorema de Gauss-Bonnet garantiza que $\chi(S) > 0$, por lo que necesariamente S es homeomorfa a una esfera \mathbb{S}^2 .

Un triángulo esférico es un polígono curvado en una esfera (de radio r) delimitado por tres arcos de geodésica (circunferencia máxima de \mathbb{S}^2). Consideremos una región esférica R delimitada por un triángulo esférico. En este caso, los ángulos internos $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ de dicho triángulo satisfacen $\theta_j + \varphi_j = \pi$, $j = 1, 2, 3$, donde $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ son los ángulos externos. Por

lo tanto, la fórmula de Gauss-Bonnet se reduce a $\int_R K dA + 3\pi - (\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) = 2\pi$, pero como $K \equiv 1/r^2$ para la esfera de radio r , obtenemos que

$$A(R) = r^2(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 - \pi),$$

donde $A(R)$ es el área de la región triangular R . Así pues, los ángulos interiores de un triángulo esférico suman más de π , y la diferencia es proporcional al área de dicho triángulo. En particular, dos triángulos esféricos con los mismos ángulos internos tienen la misma área; nótese la diferencia con la geometría euclídea plana, donde tiene sentido el concepto de triángulos semejantes (el cual deja de tener sentido en la geometría esférica).