Análisis complejo

7 de marzo de 2023

Índice general

Preliminares

Definición 0.1. Si $a \in \mathbb{C}$ y $0 \leq R_1 < R_2 \leq \infty$, se define la corona de centro a y radios R_1 y R_2 como:

$$A(a, R_1, R_2) = \{z \in \mathbb{C} : R_1 < |z - a| < R_2\}$$

Teorema 0.1. *Si $a \in \mathbb{C}$, $0 \leq R_1 < R_2 \leq \infty$ y f es holomorfa en $A(a, R_1, R_2)$, entonces existe una única sucesión $\{a_n\}_{-\infty}^{\infty}$ en $\mathbb{C}$ tal que:*

- *$\sum_{-\infty}^{\infty} a_n(z-a)^n$ converge para todo $z \in A(a, R_1, R_2)$.*
- *$f(z) = \sum_{-\infty}^{\infty} a_n(z-a)^n$ para todo $z \in A(a, R_1, R_2)$.*

Para cada $n \in \mathbb{Z}$,

$$a_n = \frac{1}{2\pi i} \int_\gamma \frac{f(z)}{(z-a)^{n+1}} dz$$

siendo γ cualquiera camino que esté en $A(a, R_1, R_2)$ con $n(\gamma, a) = 1$

Además, la serie $\sum_{-\infty}^{\infty} a_n(z-a)^n$ converge absoluta y uniformemente a cada subconjunto compacto de $A(a, R_1, R_2)$.

A esta serie se le llama desarrollo de Laurent de f en $A(a, R_1, R_2)$.

Definición 0.2. f tiene una singularidad aislada en $a \in \mathbb{C}$ si existe $R > 0$ tal que f está definida y es holomorfa en $D(a, R) \setminus \{a\} = A(a, 0, R)$.

Podemos considerar el desarrollo de Laurent de f en $D(a, R) \setminus \{a\}$. Existe una única sucesión en $\mathbb{C}$, $\{a_n\}_{-\infty}^{\infty}$, tal que:

$$f(z) = \sum_{-\infty}^{\infty} a_n(z-a)^n, \quad z \in D(a, R) \setminus \{a\}$$

Como la sucesión $\{a_n\}_{-\infty}^{\infty}$ no depende de R, a este desarrollo se le puede llamar desarrollo de Laurent de f en a o en un entorno perforado de a.

Proposición 0.2. *Sea f una función con una singularidad aislada en $a \in \mathbb{C}$ y sea $\sum_{-\infty}^{\infty} a_n(z-a)^n$ el desarrollo de Laurent de f en a. Entonces:*

1. *a es una singularidad evitable de $f \Leftrightarrow a_n = 0$ si $n < 0 \Leftrightarrow \{n < 0 : a_n \neq 0\} = \emptyset$.*
2. *a es un polo de orden N de $f \Leftrightarrow a_{-N} \neq 0$ y $a_n = 0$ si $n < -N$. Luego a es un polo de $f \Leftrightarrow \{n < 0 : a_n \neq 0\}$ es finito y no vacío.*
3. *a es una singularidad esencial de $f \Leftrightarrow \{n < 0 : a_n \neq 0\}$ es infinito.*

Definición 0.3. f tiene una singularidad aislada en ∞ si existe $R > 0$ tal que f es holomorfa en $\{z \in \mathbb{C} : |z| > R\}$.

1. Es una singularidad evitable de f si $\lim\limits_{z \to \infty} f(z)$ existe en $\mathbb{C}$.
2. Es un polo de f si $\lim\limits_{z \to \infty} f(z) = \infty$.

3. Es una singularidad esencial en otro caso.

Si f tiene una singularidad aislada en ∞, entonces f es holomorfa en $\{z \in \mathbb{C} : |z| > R\}$ para un cierto $R > 0$. Entonces la función $g(z) = f\left(\frac{1}{z}\right)$ es holomorfa en $D\left(0, \frac{1}{R}\right) \setminus \{0\}$, por lo que tiene una singularidad aislada en 0.

Entonces:

1. f tiene una singularidad evitable en $\infty \Leftrightarrow g$ tiene una singularidad evitable en 0.
2. f tiene un polo en $\infty \Leftrightarrow g$ tiene un polo en 0.
3. f tiene una singularidad esencial en $\infty \Leftrightarrow g$ tiene una singularidad esencial en 0.

Proposición 0.3. *Sea f una función con una singularidad aislada en ∞. Entonces:*

1. *∞ es una singularidad evitable de $f \Leftrightarrow f$ está acotada en un entorno perforado de ∞. Es decir, si existe $R > 0$ tal que f es holomorfa y está acotada en $\{z \in \mathbb{C} : |z| > R\}$.*
2. *∞ es un polo de $f \Leftrightarrow$ existe $N \in \mathbb{N}$ tal que $\lim\limits_{z \to \infty} \frac{f(z)}{z^N}$ existe en $\mathbb{C}$ y es distinto de 0. En este caso, N es único y se denomina el orden de ∞ como polo de f.*
3. *∞ es una singularidad esencial de $f \Leftrightarrow f(\{z \in \mathbb{C} : |z| > R\})$ es denso en $\mathbb{C}$ para todo $R > 0$ suficientemente grande.*

Observación. En (2), el orden de ∞ como polo de f coincide con el orden de 0 como polo de $f\left(\frac{1}{z}\right)$.

Si f tiene una singularidad aislada en ∞, entonces existe $R > 0$ tal que f es holomorfa en $\{z \in \mathbb{C} : |z| > R\} = A(0, R, \infty)$. Podemos considerar el desarrollo de Laurent de f en $A(0, R, \infty)$: existe una única sucesión $\{a_n\}_{-\infty}^{\infty}$ en $\mathbb{C}$ tal que:

$$f(z) = \sum_{-\infty}^{\infty} a_n z^n, \quad \text{para todo } z \in \mathbb{C} \text{ con } |z| > R$$

Como no depende de R, se le puede llamar desarrollo de Laurent de f en ∞.

Proposición 0.4. *Sea f una función con una singularidad aislada en ∞ y sea $\sum_{-\infty}^{\infty} a_n z^n$ el desarrollo de Laurent de f en ∞. Entonces:*

1. *∞ es una singularidad evitable de $f \Leftrightarrow a_n = 0$ si $n > 0$.*
2. *∞ es un polo de f de orden $N \Leftrightarrow a_N \neq 0$ y $a_n = 0$ si $n > N$.*
3. *∞ es una singularidad esencial de $f \Leftrightarrow \{n > 0 : a_n \neq 0\}$ es infinito.*

Definición 0.4. Si f tiene una singularidad aislada en $a \in \mathbb{C}$ y $\sum_{-\infty}^{\infty} a_n (z-a)^n$ es el desarrollo de Laurent de f en a, se define $Res(f, a) = a_{-1}$.

Proposición 0.5. *Sea $a \in \mathbb{C}$ y f una función con una singularidad aislada en a. Sea $R > 0$ tal que f es holomorfa en $D(a, R) \setminus \{a\}$. Entonces, para todo $r \in (0, R)$, se tiene que:*

$$Res(f, a) = \frac{1}{2\pi i} \int_{|z-a|=r} f(z) dz$$

Proposición 0.6. *Sea f una función con una singularidad aislada en ∞. Sea $R > 0$ tal que f es holomorfa en $\{z \in \mathbb{C} : |z| > R\}$. Se define:*

$$Res(f, \infty) = \frac{-1}{2\pi i} \int_{|z|=r} f(z) dz, \quad \textit{siendo } r > R$$

Proposición 0.7. *Si f tiene una singularidad aislada en ∞ y $\sum_{-\infty}^{\infty} a_n z^n$ es el desarrollo de Laurent de f en ∞, entonces $Res(f, \infty) = -a_{-1}$.*

Teorema 0.8 (Teorema de los residuos)**.** *Sea D un dominio en $\mathbb{C}$ y sea f holomorfa en D salvo por singularidades aisladas, es decir, existe $A \subset D$, A sin puntos de acumulación en D, tal que f es holomorfa en $D \setminus A$. Sea γ un camino cerrado en $D \setminus A$, con $n(\gamma, z) = 0$ para todo $z \in \mathbb{C} \setminus D$. Entonces:*

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} f(z)dz = \sum_{a \in A} Res(f, a) n(\gamma, a)$$

Teorema 0.9 (Teorema de la función inversa)**.** *Sea D un dominio en $\mathbb{C}$ y sea f holomorfa en D, con $a \in D$ tal que $f'(a) \neq 0$. Entonces existen U, V abiertos en $\mathbb{C}$ con $a \in U \subset D$, $f(a) \in V$, tales que:*

1. *f es inyectiva en U.*
2. *$f(U) = V$.*
3. *$f'(z) \neq 0$ para todo $z \in U$.*
4. *$f^{-1} : V \to U$ es holomorfa y además:*

$$(f^{-1})'(f(z)) = \frac{1}{f'(z)}, \quad \forall z \in U$$

Teorema 0.10. *Sea D un dominio en $\mathbb{C}$ y sean f holomorfa en D no constante y $a \in D$. Sea n el orden de a como cero de $f - f(a)$, es decir, el primer natural para el que $f^{(n)}(a) \neq 0$. Entonces f es localmente una aplicación $n \to 1$ cerca de a. Es decir, existe $\alpha > 0$ con $D(a, \alpha) \subset D$ tal que para todo $0 < \varepsilon < \alpha$ existe $\delta > 0$ tal que cada punto $w \in D(f(a), \delta) \setminus \{f(a)\}$ es la imagen de exactamente n puntos distintos $z_1, z_2, \ldots z_n \in D(a, \varepsilon) \setminus \{a\}$. En particular, $f(D(a, \varepsilon)) \supset D(f(a), \delta)$.*

Definición 0.5. Sea D abierto en $\mathbb{C}$ y sea f holomorfa en D salvo por polos. Si $a \in D$ es un polo de f, se tiene que $\lim_{\{} z \to a\} f(z) = \infty$. Definimos $f(a) = \infty$. Entonces $f : D \to \mathbb{C}^*$ y es continua. Se dice que f es meromorfa en D.

Teorema 0.11. *Sea D un dominio en $\mathbb{C}$ y sea f meromorfa en D, con $a \in D$ un polo de orden n de f. Entonces f es localmente una aplicación $n \to 1$ cerca de a. Es decir, existe $\alpha > 0$ tal que $D(a, \alpha) \subset D$, f es holomorfa en $D(a, \alpha) \setminus \{a\}$ y se verifica que para todo $0 < \varepsilon < \alpha$ existe $R > 0$ tal que cada punto $w \in \mathbb{C}$ con $|w| > R$ es la imagen de exactamente n puntos distintos $z_1, z_2, \ldots z_n \in D(a, \varepsilon) \setminus \{a\}$. En particular, $f(D(a, \varepsilon) \setminus \{a\}) \supset \{w \in \mathbb{C} : |w| > R\}$.*

Teorema 0.12. *Sea f una función con un polo de orden n en ∞. Entonces f es localmente una aplicación $n \to 1$ cerca de ∞. Es decir, existe $R_0 > 0$ tal que f es holomorfa en $\{z \in \mathbb{C} : |z| > R_0\}$ y se verifica que para todo $R > R_0$ existe $R' > 0$ tal que cada punto $w \in \mathbb{C}$ con $|w| > R'$ es la imagen de exactamente n puntos distintos $z_1, \ldots, z_n$ de $\{z \in \mathbb{C} : |z| > R\}$. En particular, $f(\{z \in \mathbb{C} : |z| > R\}) \supset \{w \in \mathbb{C} : |w| > R\}$.*

Teorema 0.13 (Teorema de la aplicación abierta)**.** *Sea D un dominio en $\mathbb{C}$ y sea $f : D \to \mathbb{C}$ holomorfa y no constante. Entonces f es una aplicación abierta. En particular, $f(D)$ es un dominio.*

Lema 0.14. *Sea D un dominio en $\mathbb{C}$ y sea f holomorfa en D.*

- *Sea $a \in D$. Entonces $f'(a) \neq 0$ si y solo si f es inyectiva en un entorno de a.*
- *Si f es inyectiva en D, entonces $f'(z) \neq 0$ para todo $z \in D$.*

Aplicaciones conformes

Definición 0.6. Sea D un dominio en $\mathbb{C}$ y sea $f : D \to \mathbb{C}$ holomorfa e inyectiva. Sea $D' = f(D)$. Entonces:

- D' es un dominio en D.
- $f : D \to D'$ es biyectiva.

- $f^{-1} : D' \to D$ es holomorfa.

En ese caso decimos que f es una aplicación conforme de D sobre D'.

Observación.

1. Si f es una aplicación conforme de D sobre D', entonces f^{-1} es una aplicación conforme de D' sobre D.
2. Si D_1, D_2 y D_3 son dominios en $\mathbb{C}$ con f aplicación conforme de D_1 sobre D_2 y g aplicación conforme de D_2 sobre D_3, entonces $g \circ f$ es una aplicación cnforme de D_1 sobre D_3.

Definición 0.7. Si D_1 y D_2 son dominios en $\mathbb{C}$, se dice que D_1 y D_2 son conformemente equivalentes si existe una aplicación conforme f de D_1 sobre D_2.

En el conjunto de los dominios en $\mathbb{C}$, se tiene la relación de equivalencia "ser conformemente equivalentes".

Definición 0.8. Sea D un dominio en $\mathbb{C}$. D es simplemente conexo si $\mathbb{C}^* \setminus D$ es conexo. Equivalentemente, D es simplemente conexo si todo camino cerrado γ en D es homólogo a cero módulo D, es decir, $n(\gamma, z) = 0$ para todo $z \in \mathbb{C} \setminus D$.

Teorema 0.15. *Sean D_1 y D_2 dos dominios en $\mathbb{C}$ que son conformemente equivalentes. Entonces D_1 es simplemente conexo si y solo si D_2 es simplemente conexo.*

Definición 0.9. Si $z_1, z_2 \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$, el ángulo formado por z_1 y z_2 se define como:

$$\theta(z_1, z_2) = \arg \frac{z_2}{z_1} \in (-\pi, \pi]$$

Observación. Si $z_1, z_2 \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$ y $\lambda_1, \lambda_2 > 0$, entonces $\theta(\lambda_1 z_1, \lambda_2 z_2) = \theta(z_1, z_2)$.

Definición 0.10. Sea γ un camino con origen en un punto $a \in \mathbb{C}$. Se dice que γ es regular en a si existe una parametrización $\mathcal{C}^1$ a trozos de γ, $\gamma : [0,1] \to \mathbb{C}$, tal que $\gamma'(0) \neq 0$.

Definición 0.11. Sean γ_1 y γ_2 dos caminos con origen $a \in \mathbb{C}$ que son regulares en a. El ángulo que forman γ_1 y γ_2 en a, $\theta_a(\gamma_1, \gamma_2)$, se define como sigue.

Sean $\gamma_1, \gamma_2 : [0,1] \to \mathbb{C}$ parametrizaciones $\mathcal{C}^1$ a trozos de γ_1, γ_2 respectivamente tales que $\gamma_1'(0), \gamma_2'(0) \neq 0$. Entonces $\theta_a(\gamma_1, \gamma_2) = \theta(\gamma_1'(0), \gamma_2'(0))$.

Definición 0.12. Si γ es una curva en $\mathbb{C}$ y $f : sop(\gamma) \to \mathbb{C}$ es continua, se define la curva imagen de γ por f como la curva Γ que tiene por parametrización $f \circ \gamma$, siendo γ una parametrización de γ.

Definición 0.13. Sea D un dominio en $\mathbb{C}$ y sean f holomorfa en D y $a \in D$. Diremos que f preserva ángulos en a o que f es conforme en a si se verifica lo siguiente.

Si γ_1 y γ_2 son caminos con origen a, regulares en a, entonces las curvas imagen de Γ_1 y Γ_2 por f de γ_1 y γ_2 respectivamente son caminos con oriden $f(a)$, que son regulares en $f(a)$ y se tiene que:

$$\theta_{f(a)}(\Gamma_1, \Gamma_2) = \theta_a(\gamma_1, \gamma_2)$$

Teorema 0.16. *Sea D un dominio en $\mathbb{C}$ y sean f holomorfa en D y $a \in D$. Si $f'(a) \neq 0$, entonces f es conforme en a.*

Demostración. Sean γ_1 y γ_2 caminos en D, con origen en a y regulares en a. Sean $\gamma_1, \gamma_2 : [0,1] \to \mathbb{C}$ parametrizaciones de γ_1 y γ_2 respectivamente, ambas $\mathcal{C}^1$ a trozos con $\gamma_1'(0), \gamma_2'(0) \neq 0$. Consideramos las curvas imagen de γ_1 y γ_2 por f:

$$\Gamma_1 = f \circ \gamma_1 : [0,1] \to \mathbb{C}$$
$$\Gamma_2 = f \circ \gamma_2 : [0,1] \to \mathbb{C}$$

Γ_1 y Γ_2 son $\mathcal{C}^1$ a trozos. Además, Γ_1 y Γ_2 son caminos con origen $f(a)$, porque:

$$\Gamma_1(0) = f(\gamma_1(0)) = f(a) = f(\gamma_2(0)) = \Gamma_2(0)$$

Observamos que Γ_1 y Γ_2 son regulares en a:

$$\Gamma_1'(0) = f'(\gamma_1(0))\gamma_1'(0) = f'(a)\gamma_1(0) \neq 0$$
$$\Gamma_2'(0) = f'(\gamma_2(0))\gamma_2'(0) = f'(a)\gamma_2(0) \neq 0$$

Por tanto:

$$\theta_{f(a)}(\Gamma_1, \Gamma_2) = \theta(\Gamma_1'(0), \Gamma_2'(0)) = \arg \frac{\Gamma_2'(0)}{\Gamma_1'(0)} = \theta(\gamma_1'(0), \gamma_2'(0)) = \theta_a(\gamma_1, \gamma_2)$$

□

Ejemplo (Contraejemplo)**.** Sean $D = \mathbb{C}$, $f(z) = z^2$ y $a = 0$. Observamos que $f'(a) = 0$. Sea γ_1 el segmento $[0, 1]$ y γ_2 el segmento $[0, i]$. Es claro que $\theta_0(\gamma_1, \gamma_2) = \frac{\pi}{2}$. Si consideramos las curvas imagen de γ_1 y γ_2 por f, Γ_1 y Γ_2, podemos ver que Γ_1 es el segmento $[0, 1]$ y Γ_2 el segmento $[0, -1]$, que tienen $\theta_0(\Gamma_1, \Gamma_2) = \pi \neq \frac{\pi}{2}$.

De hecho, se tiene la equivalencia. Sea D un dominio en $\mathbb{C}$ y sean f holomorfa en D y $a \in D$. Entonces $f'(a) \neq 0 \Leftrightarrow f$ es conforme en a.

Capítulo 1

Conformalidad y funciones abiertas en el disco unidad

1.1. Funciones meromorfas

Definición 1.1. Sea D un abierto en $\mathbb{C}^*$. La función $f : D \to \mathbb{C}^*$ es meromorfa en D si dado $a \in D$ se verifica una de las siguientes posibilidades:

- $a \in \mathbb{C}$ y f es holomorfa en a.
- $a \in \mathbb{C}$ y f tiene un polo en a, es decir, $f(a) = \infty$..
- $a = \infty$ y f tiene una singularidad evitable en ∞, es decir, $\lim\limits_{z\to\infty} f(z) = f(\infty) \in \mathbb{C}$.
- $a = \infty$ y f tiene un polo en a, es decir, $f(\infty) = \infty$.

Entonces $f : D \to \mathbb{C}^*$ es continua.

Observación. En el caso $D \subset \mathbb{C}$, la definición es la que ya conocíamos de función meromorfa. Si además $f(D) \subset \mathbb{C}$, se tiene una función holomorfa en D.

Observación. Sea D abierto en $\mathbb{C}^*$ y sea $f : D \to \mathbb{C}^*$ continua. Supongamos que f es holomorfa en $\{z \in D \cap \mathbb{C} : f(z) \in \mathbb{C}\}$ y que el conjunto $\{z \in D : f(z) = z\}$ no tiene puntos de acumulación en D. Entonces f es meromorfa en D.

Observación. Sea D abierto en $\mathbb{C}^*$ y sea $f : D \to \mathbb{C}^*$, f meromorfa e inyectiva en $A = \{z \in D \cap \mathbb{C} : f(z) \in \mathbb{C}\}$. Entonces f tiene a lo sumo un polo y tal polo es simple. Además, $f'(a) \neq 0$ para todo $a \in A$, por lo que f es conforme en a para todo $a \in A$.

Teorema 1.1 (Teorema de la aplicación abierta)**.** *Sea D un dominio en $\mathbb{C}^*$ y sea $f : D \to \mathbb{C}^*$ una función meromorfa y no constante en D. Entonces f es una aplicación abierta. En particular, $f(D)$ es un dominio en $\mathbb{C}^*$.*

Sea D un dominio en $\mathbb{C}^*$ y sea $f : D \to \mathbb{C}^*$ meromorfa e inyectiva, con $D' = f(D)$. Entonces:

1. D' es un dominio en $\mathbb{C}^*$.
2. $f^{-1} : D' \to D$ es meromorfa e inyectiva.

Veamos que (2) es cierto. Como f es una aplicación abierta, se tiene que f^{-1} es continua. Sea $w \in D' \cap \mathbb{C}$ tal que $z = f^{-1}(w) \in \mathbb{C}$, veamos que f^{-1} es holomorfa en w. Como $z \in \mathbb{C} \cap D$ y $f(z) \in \mathbb{C}$, f es holomorfa en z con $f'(z) \neq 0$. Por el teorema de la función inversa, f^{-1} es holomorfa en w.

1.2. Aplicaciones conformes

Definición 1.2. Sea D un dominio en $\mathbb{C}^*$ y sea $f : D \to \mathbb{C}^*$ meromorfa e inyectiva en D. Sea $D' = f(D)$. Entonces diremos que f es una aplicación conforme de D sobre D'.

En este caso, se tiene que D' es un dominio en $\mathbb{C}^*$ y que $f^{-1} : D' \to D$ es meromorfa e inyectiva en D'. Por tanto, $f : D \to D'$ es un homeomorfismo, con f y f^{-1} meromorfas.

Observación.

1. Si f es una aplicación conforme de D sobre D', entonces f^{-1} es una aplicación conforme de D' sobre D.
2. Si D_1, D_2 y D_3 son dominios en $\mathbb{C}^*$, con f aplicación conforme de D_1 sobre D_2 y g aplicación conforme de D_2 sobre D_3, entonces $g \circ f$ es una aplicación conforme de D_1 sobre D_3.

Se puede comprobar que, sean G_1, G_2 abiertos en $\mathbb{C}^*$ y $f : G_1 \to \mathbb{C}, g : G_2 \to \mathbb{C}$ meroformas tal que $f(G_1) \subset G_2$, entonces $g \circ f : G_1 \to \mathbb{C}^*$ es meromorfa.

Definición 1.3. Sean D_1 y D_2 dominios en $\mathbb{C}^*$. Diremos que D_1 y D_2 son conformemente equivalentes si existe una aplicación conforme f de D_1 sobre D_2.

En el conjunto de los dominios en $\mathbb{C}^*$, el ser conformemente equivalentes es una relación de equivalencia.

Definición 1.4. Sea D un dominio en $\mathbb{C}^*$. Diremos que D es simplemente conexo si $\mathbb{C}^* \setminus D$ es conexo.

Ejemplo.

- $D = \mathbb{C}$.
- $D = \mathbb{C}^* \setminus \{a\}$, $a \in \mathbb{C}$.
- $D = \mathbb{C}^* \setminus \overline{D}(a, R)$, $a \in \mathbb{C}$, $R > 0$.
- $D = D(a, R)$, $a \in \mathbb{C}$, $R > 0$.
- Un semiplano sin ∞.
- Un sector sin ∞.
- El plano menos dos semirrectas.
- $D = \mathbb{C} \setminus \{a\}$, $a \in \mathbb{C}$, no es simplemente conexo, porque $\mathbb{C}^* \setminus D = \{a, \infty\}$ no es conexo.

Lema 1.2. *Dado $a \in \mathbb{C}$, la transformación $T : \mathbb{C}^* \to \mathbb{C}^*$, $T(z) = \frac{1}{z-a}$ si $z \in \mathbb{C} \setminus \{a\}$, $T(a) = \infty$ y $T(\infty) = 0$, es una aplicación conforme de $\mathbb{C}^*$ sobre $\mathbb{C}^*$.*

Lema 1.3. *Sea H un homeomorfismo de $\mathbb{C}^*$ sobre $\mathbb{C}^*$. Si D es un dominio simplemente conexo en $\mathbb{C}^*$, entonces $H(D)$ es un dominio simplemente conexo en $\mathbb{C}^*$.*

Demostración. Como $H : \mathbb{C}^* \to \mathbb{C}^*$ y D es abierto y conexo en $\mathbb{C}^*$, entonces $H(D)$ es abierto y conexo en $\mathbb{C}^*$. Luego $H(D)$ es un dominio en $\mathbb{C}^*$. Como además $\mathbb{C}^* \setminus D$ es conexo, entonces $\mathbb{C}^* \setminus H(D) = H(\mathbb{C}^* \setminus D)$ es conexo. Por tanto, $H(D)$ es un dominio simplemente conexo. □

Teorema 1.4. *Sean D_1 y D_2 dos dominios en $\mathbb{C}^*$ que son conformemente equivalentes. Entonces D_1 es simplemente conexo si y solo si D_2 es simplemente conexo.*

Demostración. Sea $F : D_1 \to D_2$ aplicación conforme. Consideramos todos los posibles casos teniendo en cuenta que los papeles de D_1 y D_2 son intercambiables.

- Si $D_1, D_2 \subset \mathbb{C}$, se cumple.
- Si $D_1 = \mathbb{C}^*$, como $\mathbb{C}^*$ es cerrado y F es un homeomorfismo, se tiene que D_2 es compacto y por tanto cerrado. Entonces D_2 es abierto y cerrado en $\mathbb{C}^*$, que es conexo. Por tanto, $D_2 = \mathbb{C}^* = D_1$, ambos simplemente conexos.

- Si $D_1, D_2 \neq \mathbb{C}^*$, consideramos dos casos.
  - Supongamos que $\infty \notin D_1$ y $\infty \in D_2$. D es un dominio en $\mathbb{C}$ y D_2 es un dominio en $\mathbb{C}^*$. Sea $a \in \mathbb{C}^* \setminus D_2$, de hecho $a \in \mathbb{C} \setminus D_2$. Tomamos la aplicación conforme $T : \mathbb{C}^* \to \mathbb{C}^*$, $T(z) = \frac{1}{z-a}$ si $z \in \mathbb{C}^* \setminus \{a\}$, $T(a) = \infty$. Tenemos el diagrama:

    $$D_1 \xrightarrow{F} D_2 \xrightarrow{T} T(D_2)$$

    $T(D_2)$ es un dominio en $\mathbb{C}^*$. Como $a \notin D_2$, entonces $T(a) = \infty \notin T(D_2)$. Así que $T(D_2)$ es un dominio en $\mathbb{C}$ conformemente equivalente a D_1. Luego D_1 es simplemente conexo si y solo si $T(D_2)$ es simplemente conexo. Por el lema anterior, esto es equivalente a que D_2 sea simplemente conexo.
  - Supongamos que $\infty \in D_1, D_2$. Se sigue de un razonamiento similar usando el apartado anterior.

$\square$

1.3. Dominios conformemente equivalentes al plano complejo y al plano complejo extendido

Veremos que hay tres clases de equivalencia de dominios simplemente conexos en $\mathbb{C}^*$: $\mathbb{C}^*$, $\mathbb{C}$ y el disco unidad $\mathbb{D} = D(0,1) = \{z \in \mathbb{C} : |z| < 1\}$.

$\mathbb{C}^*$ es compacto. Si D es un dominio en $\mathbb{C}^*$ que es conformemente equivalente a $\mathbb{C}^*$, entonces D es compacto y por tanto cerrado. Como D es abierto, entonces $D = \mathbb{C}^*$.

$\mathbb{C}$ y $\mathbb{D}$ son homeomorfos. Por ejemplo, $T : \mathbb{D} \to \mathbb{C}$, $T(z) = \frac{z}{1-|z|}$ es un homeomorfismo.

Proposición 1.5. *$\mathbb{C}$ y $\mathbb{D}$ no son conformemente equivalentes.*

Demostración. Supongamos que existe una aplicación conforme F de $\mathbb{C}$ sobre $\mathbb{D}$. Entonces $F : \mathbb{C} \to \mathbb{D}$ es entera y acotada. Por el teorema de Liouville, F es constante. Esto contradice que F sea una aplicación conforme. $\square$

Proposición 1.6. *Sea f entera e inyectiva, entonces f es de la forma*

$$f(z) = \alpha z + \beta, \quad \alpha, \beta \in \mathbb{C},\ \alpha \neq 0$$

Demostración. Sea $f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n$, $z \in \mathbb{C}$, el desarrollo de Taylor de f en 0. Entonces ∞ es una singularidad aislada de f y el desarrollo anterior coincide con el desarrollo de Laurent de f en ∞.

- Si ∞ es una singularidad evitable de f, entonces $a_n = 0$ si $n \geq 1$, así que f es constante. Esto no es posible.
- Si ∞ es un polo de orden N de f, entonces $a_N \neq 0$ y $a_n = 0$ si $n > N$. Luego f es un polinomio de grado N. f' es un polinomio de grado $N-1$, con $f'(z) \neq 0$ para todo $z \in \mathbb{C}$. Así que f' es constante, por tanto $N - 1 = 0 \Rightarrow N = 1$.
- Si ∞ es una singularidad esencial de f, entonces $f(\{z \in \mathbb{C} : |z| > 1\})$ es denso en $\mathbb{C}$. Por el teorema de la aplicación abierta, $f(\{z \in \mathbb{C} : |z| < 1\})$ es abierto en $\mathbb{C}$. Estos conjuntos son disjuntos por ser f inyectiva, y esto no es posible.

$\square$

Si D es un dominio en $\mathbb{C}$ que es conformemente equivalente a $\mathbb{C}$, entonces $D = \mathbb{C}$. Veamos que esto es verdad. Sea $f : \mathbb{C} \to D$ aplicación conforme. f es entera e inyectiva, así que $f(z) = \alpha z + \beta$, con $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$, $\alpha \neq 0$. Luego $D = f(\mathbb{C}) = \mathbb{C}$.

Las aplicaciones conformes de $\mathbb{C}$ sobre $\mathbb{C}$ son de la forma:

$$f(z) = \alpha z + \beta, \quad \alpha, \beta \in \mathbb{C},\ \alpha \neq 0$$

Sea D un dominio en $\mathbb{C}^*$ que es conformemente equivalente a $\mathbb{C}$.

- Si $\infty \notin D$, entonces D es un dominio en $\mathbb{C}$ conformemente equivalente a $\mathbb{C}$ y, por tanto, $D = \mathbb{C}$.
- Si $\infty \in D$, consideramos $F : \mathbb{C} \to D$ aplicación conforme. Como sabemos que $D \neq \mathbb{C}^*$, existe $\alpha \in \mathbb{C}^* \setminus D$, de hecho $\alpha \in \mathbb{C} \setminus D$. Sea

  $$T : D \to T(D), \quad T(z) = \frac{1}{z - \alpha}$$

  Tenemos el diagrama:

  $$\mathbb{C} \xrightarrow{F} D \xrightarrow{T} T(D) = D'$$

  D' es un dominio en $\mathbb{C}$ conformemente equivalente a $\mathbb{C}$, así que $D' = \mathbb{C} = \mathbb{C}^* \setminus \{\infty\}$. Por tanto, $D = \mathbb{C}^* \setminus \{\alpha\}$.

Hemos probado que si D es un dominio en $\mathbb{C}^*$ conformemente equivalente a $\mathbb{C}$, entonces $D = \mathbb{C}$ o $D = \mathbb{C}^* \setminus \{\alpha\}$, con $\alpha \in \mathbb{C}$. Es decir, $D = \mathbb{C}^* \setminus \{\alpha\}$, $\alpha \in \mathbb{C}^*$.

Los dominios en $\mathbb{C}^*$ que son conformemente equivalentes a $\mathbb{C}$ son $\mathbb{C}^* \setminus \{\alpha\}$, $\alpha \in \mathbb{C}^*$.

Aplicaciones conformes de $\mathbb{C}^*$ sobre $\mathbb{C}^*$

Sea $T : \mathbb{C}^* \to \mathbb{C}^*$ aplicación conforme. Sea $a \in \mathbb{C}^*$ tal que $T(a) = \infty$. Consideramos dos casos:

1. Si $a = \infty$, $T(\infty) = \infty$. $T : \mathbb{C} \to \mathbb{C}$ es una aplicación conforme, así que $T(z) = \alpha z + \beta$, con $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$, $\alpha \neq 0$.
2. Si $a \in \mathbb{C}$, $T(a) = \infty$. T es holomorfa en $\mathbb{C} \setminus \{a\}$, así que a es un polo simple de T. Consideramos el desarrollo de Laurent de T en a.

   $$T(z) = \frac{A_{-1}}{z - a} + \sum_{n=0}^{\infty} A_n (z - a)^n, \quad z \in \mathbb{C} \setminus \{a\},\ A_{-1} \neq 0$$

   ∞ es una singularidad aislada de T. De hecho, es una singularidad evitable.

   Sea $F(z) = T(z) - \frac{A_{-1}}{z-a}$, $z \in \mathbb{C} \setminus \{a\}$. F es holomorfa en $\mathbb{C} \setminus \{a\}$. a es singularidad evitable de F y $\lim\limits_{z \to \infty} F(z) = T(\infty) \in \mathbb{C}$, así que ∞ es una singularidad evitable también. Evitando la singularidad de F en a, tenemos que F es entera y acotada. Por tanto F es constante. Así que $F(z) = a_0$, para todo $z \in \mathbb{C}$. Entonces:

   $$T(z) = F(z) + \frac{A_{-1}}{z - a} = a_0 + \frac{A_{-1}}{z - a} = \frac{a_0 z + (A_{-1} - a_0 a)}{z - a}$$

En cualquiera de los dos casos, T es de la forma:

$$T(z) = \frac{\alpha z + \beta}{\gamma z + \delta}, \quad \alpha, \beta, \gamma, \delta \in \mathbb{C}$$

No todas las aplicaciones de esta forma son aplicaciones conformes de $\mathbb{C}^*$ sobre $\mathbb{C}^*$.

Ejemplo (Contraejemplo)**.** No es una aplicación conforme si $\alpha = \beta = 0$ o (α, β) y (γ, δ) son proporcionales. Por ejemplo:

$$T(z) = \frac{3z + 2}{6z + 4} = \frac{1}{2}$$

Para que las aplicaciones de esa forma sean aplicaciones conformes de $\mathbb{C}^*$ sobre $\mathbb{C}^*$, se tiene que verificar que:

$$\begin{vmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{vmatrix} \neq 0$$

En el caso (1), $T(z) = Az + B = \frac{Az+B}{0z+1}$, con $A, B \in \mathbb{C}$, $A \neq 0$, luego:

$$\begin{vmatrix} A & B \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = A \neq 0$$

En el caso (2),

$$\begin{vmatrix} a_0 & A_{-1} - a_0 a \\ 1 & -a \end{vmatrix} = -a_0 a - A_{-1} + a_0 a = -A_{-1} \neq 0$$

Teorema 1.7. *Las aplicaciones conformes de $\mathbb{C}^*$ en $\mathbb{C}^*$ son de la forma:*

$$T(z) = \frac{\alpha z + \beta}{\gamma z + \delta}, \quad \alpha, \beta, \gamma, \delta \in \mathbb{C},\ \alpha\delta - \beta\gamma \neq 0$$

Demostración. Sea $T : \mathbb{C}^* \to \mathbb{C}^*$ una aplicación de esa forma.

- Si $\gamma = 0$, entonces:

  $$T(z) = \frac{\alpha z + \beta}{\delta} = \frac{\alpha}{\delta} z + \frac{\beta}{\delta}, \quad \alpha, \delta \neq 0$$

  T es una aplicación conforme de $\mathbb{C}$ sobre $\mathbb{C}$, con $\lim_{z \to \infty} T(z) = \infty$. Definiendo $T(\infty) = \infty$, tenemos que $T : \mathbb{C}^* \to \mathbb{C}^*$ es una aplicación conforme.

- Si $\gamma \neq 0$, entonces $T : \mathbb{C}^* \to \mathbb{C}^*$,

  $$\begin{aligned} T(z) &= \frac{\alpha z + \beta}{\gamma z + \delta}, \quad z \in \mathbb{C} \setminus \left\{-\frac{\delta}{\gamma}\right\} \\ T\left(-\frac{\delta}{\gamma}\right) &= \infty \\ T(\infty) &= \frac{\alpha}{\gamma} \end{aligned}$$

  T es meromorfa en $\mathbb{C}^*$ y T es inyectiva.

  Veamos que T es sobreyectiva. Sea $w \in \mathbb{C} \setminus \{\frac{\alpha}{\gamma}\}$ y sea $z \in \mathbb{C} \setminus \left\{-\frac{\delta}{\gamma}\right\}$. Entonces:

  $$T(z) = w \Leftrightarrow \frac{\alpha z + \beta}{\gamma z + \delta} = w \Leftarrow \alpha z + \beta = \gamma z w + \delta w \Leftrightarrow (\alpha - \gamma w) z = \delta w - \beta \Leftrightarrow z = \frac{\delta w - \beta}{-\gamma w + \alpha}$$

  Por tanto, T es una aplicación conforme de $\mathbb{C}^*$ sobre $\mathbb{C}^*$.

Además, hemos probado que T^{-1} es de la forma:

$$T^{-1}(z) = \frac{\delta z - \beta}{-\gamma z + \alpha}, \quad \begin{vmatrix} \delta & -\beta \\ -\gamma & \alpha \end{vmatrix} = \alpha\delta - \beta\gamma \neq 0$$

Si $\gamma = 0$, también es válida esta expresión. $\square$

1.4. Funciones holomorfas en el disco unidad

Teorema 1.8 (Lema de Schwarz)**.** *Sea φ una función holomorfa en $\mathbb{D}$ tal que $\varphi(0) = 0$ y $\varphi(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$. Entonces:*

1. *$|\varphi(z)| \le |z|$ para todo $z \in \mathbb{D}$.*
2. *$|\varphi'(0)| \le 1$.*

Además, se da la igualdad en (1) para algún $z \in \mathbb{D}$ con $z \neq 0$ o bien se da la igualdad en (2) si y solo si φ es una rotación de $\mathbb{D}$, es decir, si existe $\lambda \in \mathbb{C}$ con $|\lambda| = 1$ tal que $\varphi(z) = \lambda z$ para todo $z \in \mathbb{D}$.

Observación. Si φ es una rotación, entonces se da la igualdad en (1) para todo $z \in \mathbb{D}$ y se da la igualdad en (2).

Observación. El teorema se puede enunciar de forma equivalente con la condición $\varphi(\mathbb{D}) \subset \overline{\mathbb{D}}$ en lugar de $\varphi(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$. Es decir, si φ es holomorfa en $\mathbb{D}$ con $\varphi(0) = 0$ y $\varphi(\mathbb{D}) \subset \overline{\mathbb{D}}$, entonces $\varphi(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$.
Veamos que esto es cierto. Supongamos que existe $z_0 \in \mathbb{D}$ con $|\varphi(z_0)| = 1$. Como $|\varphi(z)| \le 1$ para todo $z \in \mathbb{D}$, por el principio del máximo φ es constante, luego $\varphi \equiv \varphi(0) = 0$. Esto contradice que $|\varphi(z_0)| = 1$.

Sea f holomorfa en $\mathbb{D}$ con $(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$. Sea $a \in \mathbb{D}$ y $b = f(a) \in \mathbb{D}$. Definimos:

$$T_a(z) = \frac{z+a}{1+\bar{a}z}, \qquad T_a \in \mathcal{M},\ T_a(\mathbb{D}) = \mathbb{D},\ T_a(0) = a$$

$$S_b(z) = \frac{z-b}{1-\bar{b}z}, \qquad S_b \in \mathcal{M},\ S_b(\mathbb{D}) = \mathbb{D},\ S_b(b) = 0$$

Sea $\varphi = S_b \circ f \circ T_a$. φ es holomorfa en $\mathbb{D}$, con $\varphi(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$ y $\varphi(0) = 0$. Por el lema de Schwarz,

1. $|\varphi(z)| \le |z|$ para todo $z \in \mathbb{D}$.
2. $|\varphi(0)| \le 1$.

Además, se da la igualdad en (1) para algún $z \in \mathbb{D}$, $z \neq 0$, o bien se da la igualdad en (2) si y solo si φ es una rotación.

Desarrollamos las dos expresiones:

1. Sea $z \in \mathbb{D}$. Consideramos $T_a^{-1}(z) \in \mathbb{D}$.

$$|\varphi(T_a^{-1}(z))| \le |T_a^{-1}(z)| \Leftrightarrow |S_b(f(z))| \le |S_a(z)| \Leftrightarrow \left|\frac{f(z)-b}{1-\bar{z}f(z)}\right| \le \left|\frac{z-a}{1-\bar{a}z}\right| \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow \left|\frac{f(z)-f(a)}{1-\overline{f(a)}f(z)}\right| \le \left|\frac{z-a}{1-\bar{a}z}\right|, \quad \forall z \in \mathbb{D}$$

   Además, si se da la igualdad para algún $z \in \mathbb{D}$, $z \neq a$, entonces φ es una rotación. Entonces, $f = S_b^{-1} \circ \varphi \circ T_a^{-1} \in \mathcal{M}$, con $f(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$.

2. Por la regla de la cadena, $\varphi'(0) = T_a'(0) f'(a) S_b'(b)$.

$$T_a'(z) = \frac{1+\bar{a}z-(z+a)\bar{a}}{(1+\bar{a}z)^2}, \qquad T_a'(0) = 1-|a|^2$$

$$S_b'(z) = \frac{1-\bar{b}z+(z-b)\bar{b}}{(1-\bar{b}z)^2}, \qquad S_b'(b) = \frac{1-|b|^2}{(1-|b|^2)} = \frac{1}{1-|b|^2}$$

   Así que:

$$\varphi'(0) = (1-|a|^2) f'(a) \frac{1}{1-|b|^2}$$

Por tanto:

$$|\varphi'(0)| \leq 1 \Leftrightarrow (1-|a|^2)f'(a)\frac{1}{1-|b|^2} \leq 1 \Leftrightarrow \frac{|f'(a)|}{1-|f(a)|^2} \leq \frac{1}{1-|a|^2}$$

Además, si se da la igualdad, entonces φ es una rotación y por tanto $f \in \mathcal{M}$, con $f(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$. Por tanto, hemos probado lo siguiente:

1. Para todo $z \in \mathbb{D}$,

$$\left|\frac{f(z)-f(a)}{1-\overline{f(a)}f(z)}\right| \leq \left|\frac{z-a}{1-\bar{a}z}\right|$$

Si se da la igualdad para algún $z \in \mathbb{D}$ con $z \neq a$ entonces $f \in \mathcal{M}$ y $f(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$.

2.
$$\frac{|f'(a)|}{1-|f(a)|^2} \leq \frac{1}{1-|a|^2}$$

Si se da la igualdad entonces $f \in \mathcal{M}$ y $f(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$.

1.5. El teorema de Schwarz-Pick

Teorema 1.9 (Teorema de Schwarz-Pick)**.** *Sea f holomorfa en $\mathbb{D}$ con $f(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$. Entonces:*

1. Para todo $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$,

$$\left|\frac{f(z_2)-f(z_1)}{1-\overline{f(z_1)}f(z_2)}\right| \leq \left|\frac{z_2-z_1}{1-\overline{z_1}z_2}\right|$$

2. Para todo $z \in \mathbb{D}$,

$$\frac{|f'(z)|}{1-|f(z)|^2} \leq \frac{1}{1-|z|^2}$$

Además, se da la igualdad en (1) para algún par de puntos $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$ con $z_1 \neq z_2$ o bien se da la igualdad en (2) para algún $z \in \mathbb{D}$ si y solo si $f \in \mathcal{M}$ y $f(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$, en cuyo caso se da la igualdad en (1) para todo $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$ y se da la igualdad en (2) para todo $z \in \mathbb{D}$.

Proposición 1.10. *Sea $T \in \mathcal{M}$ con $T(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$. Entonces:*

1. Para todo $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$,

$$\left|\frac{T(z_2)-T(z_1)}{1-\overline{T(z_1)}T(z_2)}\right| = \left|\frac{z_2-z_1}{1-\overline{z_1}z_2}\right|$$

2. Para todo $z \in \mathbb{D}$,

$$\frac{|T'(z)|}{1-|T(z)|^2} \leq \frac{1}{1-|z|^2}$$

Definición 1.5. Dados $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$, definimos:

$$\rho(z_1, z_2) = \left|\frac{z_2-z_1}{1-\overline{z_1}z_2}\right|$$

Observamos que si $1-\overline{z_1}z_2 = 0$ entonces $\overline{z_1}z_2 = 1 \Rightarrow |z_1||z_2| = 1$. Como esto no ocurre, ρ está bien definida.

La primera parte del teorema de Schwarz-Pick se puede reescribir usando ρ.

Sea f holomorfa en $\mathbb{D}$ con $f(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$. Entonces:

$$\rho(f(z_1), f(z_2)) \leq \rho(z_1, z_2), \quad \text{si } z_1, z_2 \in \mathbb{D}$$

Además, se da la igualdad para algún par de puntos distintos $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$ si y solo si $f \in \mathcal{M}$ y $f(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$, en cuyo caso se da la igualdad para todo $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$.

Vamos a ver que ρ es una distancia en $\mathbb{D}$.

$$\begin{aligned} \rho :& D \times D \to \mathbb{R} \\ & (z_1, z_2) \mapsto \rho(z_1, z_2) = \left| \frac{z_2 - z_1}{1 - \overline{z_1} z_2} \right| \end{aligned}$$

- $\rho(z_1, z_2) \leq 0$.
- $\rho(z_1, z_2) = \rho(z_2, z_1)$.
- $\rho(z_1, z_2) = 0 \Leftrightarrow z_1 = z_2$.
- $\rho(z_1, z_3) \leq \rho(z_1, z_2) + \rho(z_2, z_3)$.

Lema 1.11. *Para todo $a, z \in \mathbb{D}$,*

$$\frac{||z| - |a||}{1 - |a||z|} \leq \left| \frac{z - a}{1 - \bar{a}z} \right| \leq \frac{|z| + |a|}{1 + |a||z|}$$

Observamos que si $a, z \in \mathbb{D}$, tenemos:

$$\rho(a, z) = \left| \frac{z - a}{1 - \bar{a}z} \right| = |S_a(z)| < 1, \quad S_a \in \mathcal{M}, S_a(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$$

Dados $a \in \mathbb{D}$ y $0 < r < 1$, denotamos:

$$\Delta(a, r) = \{z \in \mathbb{D} : \rho(z, a) < r\}$$

Entonces, dado $z \in \mathbb{D}$, se tiene que:

$$z \in \Delta(a, r) \Leftrightarrow \rho(z, a) < r \Leftrightarrow |S_a(z)| < r \Leftrightarrow S_a(z) \in D(0, r) \Leftrightarrow z \in S_a^{-1}(D(0, r)) \Leftrightarrow z \in T_a(D(0, r))$$

Entonces $\Delta(a, r) = T_a(D(0, r))$.

$T_a(\partial D(0, r))$ es una circunferencia C contenida en $\mathbb{D}$. Sean c y R el centro y el radio de C, con $c \in \mathbb{C}$, $R > 0$. Entonces $T_a(D(0, r)) = D(c, R)$. Por tanto:

$$\Delta(a, r) = T_a(D(0, r)) = D(c, R)$$

Así que $\Delta(a, r)$ es un disco euclídeo. Como $T_a(0) = a$ tenemos que $a \in \Delta(a, r)$, pero a no tiene por qué ser el centro del disco.

Vamos a calcular c y R. Si $a = 0$, $T_a(z) = z$ luego $T_a(D(0, r)) = D(0, r)$. Supongamos que $a \neq 0$. Sea L la recta que pasa por 0 y a. Calculamos $S_a(L)$ hallando la imagen de tres puntos.

$$\begin{aligned} S_a(0) &= -a \\ S_a(a) &= 0 \\ S_a\left(\frac{1}{\bar{a}}\right) &= \infty \end{aligned}$$

$L' = S_a(L)$ es la recta que pasa por 0 y por $-a$, luego L' coincide con L. Como L' es perpendicular a $\partial D(0,r)$ en los dos puntos de corte y T_a preserva ángulos en esos dos puntos, entonces L es perpendicular a C. Por tanto c está en L.

El diámetro $\left[-r\frac{a}{|a|}, r\frac{a}{|a|}\right]$ se aplica mediante T_a en un diámetro de C, que es:

$$\left[T_a\left(-r\frac{a}{|a|}\right), T_a\left(r\frac{a}{|a|}\right)\right]$$

Entonces:

$$c = \frac{1}{2}\left(T_a\left(-r\frac{a}{|a|}\right) + T_a\left(r\frac{a}{|a|}\right)\right)$$
$$R = \frac{1}{2}\left|T_a\left(r\frac{a}{|a|}\right) - T_a\left(-r\frac{a}{|a|}\right)\right|$$

Calculamos:

$$T_a\left(-r\frac{a}{|a|}\right) = \frac{-r\frac{a}{|a|}+a}{1-\bar{a}r\frac{a}{|a|}} = \frac{-ra+a|a|}{|a|-r|a|^2} = \frac{a(|a|-r)}{|a|(1-r|a|)}$$
$$T_a\left(r\frac{a}{|a|}\right) = \frac{r\frac{a}{|a|}+a}{1+\bar{a}r\frac{a}{|a|}} = \frac{ra+a|a|}{|a|+r|a|^2} = \frac{a(|a|+r)}{|a|(1+r|a|)}$$

Se llega a que:

$$c = \frac{1-r^2}{1-r^2|a|^2}a$$
$$R = \frac{r(1-|a|^2)}{1-r^2|a|^2}$$

Observamos que los puntos de mayor y menor módulo de C son $T_a\left(-r\frac{a}{|a|}\right)$ y $T_a\left(r\frac{a}{|a|}\right)$ Veamos que, de hecho,

$$\left|T_a\left(-r\frac{a}{|a|}\right)\right| = \frac{||a|-r|}{1-r|a|} \le \frac{r+|a|}{1+r|a|} = \left|T_a\left(r\frac{a}{|a|}\right)\right|$$

- Si $|a| \ge r$,

$$\frac{|a|-r}{1-r|a|} \le \frac{r+|a|}{1+r|a|} \Leftrightarrow |a|+r|a|^2-r-r^2|a| \le r+|a|-r^2|a|-r|a|^2 \Leftrightarrow 2r|a|^2 \le 2r \Leftrightarrow |a| \le 1$$

- Si $|a| < r$ se razona de forma análoga.

Entonces, para todo $z \in \partial D(0,r)$ se tiene que:

$$\frac{||a|-r|}{1-r|a|} \le T_a(z) \le \frac{r+|a|}{1+r|a|} \Leftrightarrow \frac{||a|-r|}{1-r|a|} \le \left|\frac{z+a}{1+\bar{a}z}\right| \le \frac{r+|a|}{1+r|a|} \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow \frac{||a|-|z||}{1-|z||a|} \le \left|\frac{z+a}{1+\bar{a}z}\right| \le \frac{|z|+|a|}{1+|z||a|} \le |z|+|a|$$

Hemos probado esto para $a, z \in \mathbb{D}$, $a, z \neq 0$. Pero si $a = 0$ o $z = 0$ la desigualdad es trivial. Por tanto, esta cadena de desigualdades es cierta para todo $a, z \in \mathbb{D}$.

Cambiando a por $-a$, tenemos:

$$\frac{||a|-|z||}{1-|z||a|} \le \left|\frac{z-a}{1-\bar{a}z}\right| \le \frac{|z|+|a|}{1+|z||a|} \le |z|+|a|, \quad z, a \in \mathbb{D}$$

Las desigualdades primera y segunda corresponden al último lema.

Por otro lado,

$$\rho(a,z) \leq |z| + |a|, \quad z, a \in \mathbb{D}$$

Como $\rho(z_1, 0) = |z_1|$ y $\rho(0, z_2) = |z_2|$, entonces:

$$\rho(a,z) \leq \rho(a,0) + \rho(0,z), \quad a, z \in \mathbb{D}$$

Esto es un caso particular de la desigualdad triangular.

Sean $z_1, z_2, z_3 \in \mathbb{D}$. Tenemos, usando el teorema de Schwarz-Pick,

$$\begin{aligned}\rho(z_1, z_3) = \rho(S_{z_2}(z_1), S_{z_2}(z_3)) &\leq \rho(S_{z_2}(z_1, 0)) + \rho(0, S_{z_2}(z_3)) = \\ &= \rho(S_{z_2}(z_1), S_{z_2}(z_2)) + \rho(S_{z_2}(z_2), S_{z_2}(z_3)) = \rho(z_1, z_2) + \rho(z_2, z_3)\end{aligned}$$

Así que ρ verifica la desigualdad triangular. Por tanto, ρ es una distancia en $\mathbb{D}$ que se denomina distancia pseudohiperbólica en $\mathbb{D}$.

$$\rho(z_1, z_2) = \left|\frac{z_2 - z_1}{1 - \overline{z_1} z_2}\right| = |S_{z_1}(z_2)| < 1$$

Si $a \in \mathbb{D}$ y $0 < r < 1$, el disco pseudohiperbólico de centro a y radio r es:

$$\Delta(a, r) = \{z \in \mathbb{D} : \rho(z, a) < r\}$$

No consideramos $r \geq 1$ porque $\Delta(a,r) = \mathbb{D}$. Sabemos que $\Delta(a,r)$ es un disco euclídeo, en concreto un disco abierto de centro $\frac{1-r^2}{1-r^2|a|^2}a$ y radio $\frac{r(1-|a|^2)}{1-r^2|a|^2}$. Si $a = 0$, $\Delta(a,r) = D(0,r)$.

Esta distancia es equivalente a la distancia euclídea en $\mathbb{D}$.

Si $T \in \mathcal{M}$ con $T(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$, se tiene que:

$$\rho(T(z_1), T(z_2)) = \rho(z_1, z_2), \quad z_1, z_2 \in \mathbb{D}$$

Además, si f es holomorfa en $\mathbb{D}$ y $f(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$, se tiene que:

$$\rho(f(z_1), f(z_2)) \leq \rho(z_1, z_2), \quad z_1, z_2 \in \mathbb{D}$$

1.6. Subordinación

Definición 1.6. Sean f, F holomorfas en $\mathbb{D}$. Diremos que f está subordinada a F, $f \prec F$, si existe w holomorfa en $\mathbb{D}$, con $w(0) = 0$ y $w(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$ tal que $f = F \circ w$.

Observación. w está en las condiciones del lema de Schwarz.

Veamos algunas propiedades:

- $f(0) = F(w(0)) = F(0)$.
- $f(\mathbb{D}) = F(w(\mathbb{D})) \subset F(\mathbb{D})$.
- Si $0 < r < 1$, veamos que
$$f(D(0,r)) \subset F(D(0,r))$$
Si $z \in D(0,r)$, $f(z) = F(w(z))$. Por el lema de Schwarz,
$$|w(z)| \leq |z| < r$$

- Si $0 < r < 1$, veamos que
$$\max_{|z|=r} |f(z)| \leq \max_{|z|=r} |F(z)|$$
Si $|z| = r$, como por el lema de Schwarz $|w(z)| \leq |z| = r$, entonces:
$$|f(z)| = |F(w(z))| \leq \max_{|z|\leq r} |F(z)| \Rightarrow \max_{|z|=r} |f(z)| \leq \max_{|z|\leq r} |F(z)|$$

- Si $|z| = r$, como por el lema de Schwarz $|w'(0)| \leq 1$ y además $f'(0) = F'(w(0))w'(0) = F'(0)w'(0)$, entonces:
$$|f(z)| = |F(w(z))| \leq \max_{|z|\leq r} |F(z)| \Rightarrow \max_{|z|=r} |f(z)| \leq \max_{|z|\leq r} |F(z)|$$

- No se verifica para todo $r \in (0, 1)$ que
$$\max_{|z|=r} |f'(z)| \leq \max_{|z|=r} |F'(z)|$$

Ejemplo (Contraejemplo)**.** Sean $f(z) = z^2$ y $F(z) = z$. Podemos tomar $w(z) = z^2$, que verifica $w(0) = 0$ y $w(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$, luego $f \prec F$. Si $0 < r < 1$,
$$\max_{|z|=r} |f'(z)| = \max_{|z|=r} 2|z| = 2r$$
$$\max_{|z|=r} |F'(z)| = 1$$
Observamos que no se cumple que $2r \leq 1$ para todo $r \in (0, 1)$.

Por la segunda parte del teorema de Schwarz-Pick,
$$\frac{|w'(z)|}{1 - |w(z)|^2} \leq \frac{1}{1 - |z|^2}, \quad z \in \mathbb{D}$$
Entonces, si $z \in \mathbb{D}$,
$$|f'(z)| = |F'(w(z))||w'(z)| \leq |F'(w(z))| \frac{1 - |w(z)|^2}{1 - |z|^2} \Leftrightarrow (1 - |z|^2)|f'(z)| \leq (1 - |w(z)|^2)|F'(w(z))|$$
Entonces, si $0 < r \leq 1$, tenemos que:
$$\sup_{|z|<r} (1 - |z|^2)|f'(z)| \leq \sup_{|z|<r} (1 - |z|^2)|F'(z)|$$
Veamos que esto es cierto. Si $|z| < r$, como $|w(z)| \leq |z| < r$,
$$(1 - |z|^2)|f'(z)| \leq (1 - |w(z)|^2)|F'(w(z))| \leq \sup_{|z|<r} (1 - |z|^2)|F'(z)|$$

Proposición 1.12. *Sean f, F holomorfas en $\mathbb{D}$, con $f \prec F$. Entonces:*

1. $f(0) = F(0)$.
2. $f(\mathbb{D}) \subset F(\mathbb{D})$.
3. *Para todo $r \in (0, 1)$,*
$$f(D(0, r)) \subset F(D(0, r))$$
4. *Para todo $r \in (0, 1)$,*
$$\max_{|z|=r} |f(z)| \leq \max_{|z|=r} |F(z)|$$

5. $|f'(0)| \leq |F'(0)|$.
6. *Para todo* $r \in (0,1]$,

$$\sup_{|z|<r}(1-|z|^2)|f'(z)| \leq \sup_{|z|<r}(1-|z|^2)|F'(z)|$$

La última propiedad tiene mucha relación con el espacio de Bloch $\mathcal{B}$ de las funciones holomorfas en $\mathbb{D}$ que satisfacen:

$$\sup_{z\in\mathbb{D}}(1-|z|^2)|f'(z)| < \infty$$

Observación. Veamos qué se puede decir sobre los coeficientes de Taylor. Sean f y F holomorfas en $\mathbb{D}$ con $f \prec F$. Consideramos los desarrollos de Taylor de f y F para $z \in \mathbb{D}$:

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n$$
$$F(z) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n z^n$$

Usando (1), observamos que:

$$\begin{cases} a_0 = f(0) \\ A_0 = F(0) \end{cases} \Rightarrow a_0 = A_0$$

Con (2), vemos que:

$$\begin{cases} a_1 = f'(0) \\ A_1 = F'(0) \end{cases} \Rightarrow |a_1| \leq |A_1|$$

No podemos decir nada más. Por ejemplo, dado $N \geq 2$, podemos considerar $f(z) = z^N$ y $F(z) = z$. Observamos que $f \prec F$ con $w(z) = z^N$. Observamos que $a_N = 1$ y $A_N = 0$, luego no es cierto que $|a_n| \leq |A_n|$.

Veamos ahora un ejemplo importante de subordinación. Sea F una aplicación conforme de $\mathbb{D}$ sobre D, siendo D un dominio en $\mathbb{C}$. Si f es holomorfa en $\mathbb{D}$ tal que $f(\mathbb{D}) \subset D$ y $f(0) = F(0)$, entonces $f \prec F$.

Sea $w = F^{-1} \circ f$. w es holomorfa en $\mathbb{D}$, $w(0) = F^{-1}(f(0)) = F^{-1}(F(0)) = 0$ y $w(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$. Además, $f = F \circ w$.

Por ejemplo:

$$P(z) = \frac{1+z}{1-z}$$

Esta es una transformación de Möbius que aplica $\partial\mathbb{D}$ en el eje imaginario. $P(\mathbb{D})$ es el semiplano de la derecha $\{z \in \mathbb{C} : \mathrm{Re}(z) > 0\}$ y $P(0) = 1$. Entonces, si f es holomorfa en $\mathbb{D}$, $f(\mathbb{D}) \subset \{z \in \mathbb{C} : \mathrm{Re}(z) > 0\}$ y $f(0) = P(0)$, entonces $f \prec P$. Es decir, si f es holomorfa en $\mathbb{D}$, $\mathrm{Re}(f(z)) > 0$ para todo $z \in \mathbb{D}$ y $f(0) = 1$, entonces $f \prec F$.

Sea $\mathcal{P} = \{f \text{ holomorfa en } \mathbb{D} : \mathrm{Re}(f(z)) > 0\ \forall z \in \mathbb{D}, f(0) = 1\}$. Entonces:

- $P \in \mathcal{P}$.
- $f \in \mathcal{P} \Rightarrow f \prec P$. De hecho, $\mathcal{P} = \{f \text{ holomorfa en } \mathbb{D} : f \prec P\}$.
- $f \in \mathcal{P} \Rightarrow \frac{1}{f} \in \mathcal{P}$.

Teorema 1.13. *Si* $f \in \mathcal{P}$, *entonces:*

1. *Para todo* $z \in \mathbb{D}$,

$$\frac{1-|z|}{1+|z|} \leq |f(z)| \leq \frac{1+|z|}{1-|z|}$$

2. $|f'(0)| \leq 2$

Veamos cuáles son las aplicaciones conformes de $\mathbb{D}$ sobre $\mathbb{D}$.

Sea f una aplicación conforme de $\mathbb{D}$ sobre $\mathbb{D}$. Sea $a = f(0) \in \mathbb{D}$. Aplicando la segunda parte del teorema de Schwarz-Pick a f en 0, tenemos:

$$\frac{|f'(0)|}{1-|a|^2} \leq 1$$

y si se diera igualdad, f sería una transformación de Möbius.

Sea $g = f^{-1}$, que es holomorfa en $\mathbb{D}$ y $g(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$. Aplicando lo mismo en el punto a tenemos:

$$|g'(a)| \leq \frac{1}{1-|a|^2}$$

y si se diera igualdad, g sería una transformación de Möbius.

Tenemos que:

$$|f'(0)| \leq 1-|a|^2 \leq \frac{1}{|g'(a)|} = |f'(0)|$$

Por tanto se da igualdad, así que f es una transformación de Möbius con $f(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$. En conclusión, las aplicaciones conformes de $\mathbb{D}$ sobre $\mathbb{D}$ son:

$$\{\lambda T_a : \lambda \in \mathbb{C}, |\lambda| = 1, a \in \mathbb{D}\} = \{\lambda S_a : \lambda \in \mathbb{C}, |\lambda| = 1, a \in \mathbb{D}\} = \{\lambda \varphi_a : \lambda \in \mathbb{C}, |\lambda| = 1, a \in \mathbb{D}\}$$

1.7. La métrica de Poincaré

Si γ es un camino en $\mathbb{C}$ y $f : sop(\gamma) \to \mathbb{C}$ es continua, entonces:

$$\int_\gamma f(z)dz = \int_a^b f(\gamma(t))\gamma'(t)dt$$
$$\int_\gamma f(z)|dz| = \int_a^b f(\gamma(t))|\gamma'(t)|dt$$

siendo $\gamma : [a,b] \to \mathbb{C}$ una parametrización $\mathcal{C}^1$ a trozos de γ.

Veamos algunas propiedades:

1. Si f es real, entonces $\int_\gamma f(z)|dz| \in \mathbb{R}$. Si además f es no negativa, entonces $\int_\gamma f(z)|dz| \geq 0$.
2. Si $f(z) = 1$,
$$\int_\gamma f(z)|dz| = \int_a^b |\gamma'(t)|dt = long(\gamma)$$
3.
$$\left|\int_\gamma f(z)dz\right| \leq \int_\gamma |f(z)||dz| \leq \max_{z\in sop(\gamma)} |f(z)| long(\gamma)$$
4. Si $f, g : sop(\gamma) \to \mathbb{R}$ continuas y $f \leq g$, entonces:
$$\int_\gamma f(z)|dz| \leq \int_\gamma g(z)|dz|$$
5.
$$\int_{\gamma_1+\gamma_2} f(z)|dz| = \int_{\gamma_1} f(z)|dz| + \int_{\gamma_2} f(z)|dz|$$

6.
$$\int_{-\gamma} f(z)|dz| = \int_{\gamma} f(z)|dz|$$

7.
$$\int_{\gamma} (af(z) + bg(z))|dz| = a\int_{\gamma} f(z)|dz| + b\int_{\gamma} g(z)|dz|, \quad a, b \in \mathbb{C}$$

Sean $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$. Sea γ un camino en $\mathbb{D}$ con origen z_1 y extremo z_2. Podemos considerar la integral
$$\int_{\gamma} \frac{1}{1 - |z|^2}|dz| = \int_{\gamma} \frac{|dz|}{1 - |z|^2}$$

Como la función $z \in \mathbb{D} \mapsto \frac{1}{1-|z|^2}$ es real y positiva, entonces la integral es no negativa. Definimos:
$$\delta(z_1, z_2) = \text{ínf}\left\{\int_{\gamma} \frac{|dz|}{1 - |z|^2} : \gamma \text{ camino en } \mathbb{D} \text{ con origen } z_1 \text{ y extremo } z_2\right\}$$

Entonces:

- $\delta(z_1, z_2) \geq 0$.
- $\delta(z_1, z_2) = \delta(z_2, z_1)$.
- $\delta(z_1, z_2) = 0 \Leftrightarrow z_1 = z_2$.

Sean $z_1, z_2, z_3 \in \mathbb{D}$. Consideramos:
$$A_{12} = \left\{\int_{\gamma} \frac{|dz|}{1 - |z|^2} : \gamma \text{ camino en } \mathbb{D} \text{ con origen } z_1 \text{ y extremo } z_2\right\}$$

Se definen de manera análoga A_{13} y A_{23}. Observamos que $A_{12} + A_{23} \subset A_{13}$. Por tanto:
$$\text{ínf}(A_{12} + A_{13}) = \text{ínf}\, A_{12} + \text{ínf}\, A_{23} \geq \text{ínf}\, A_{13} \Leftrightarrow \delta(z_1, z_3) \leq \delta(z_1, z_2) + \delta(z_2, z_3)$$

δ es una distancia en $\mathbb{D}$, denominada distancia hiperbólica en $\mathbb{D}$.

Proposición 1.14.

1. *Si f es holomorfa en $\mathbb{D}$ con $f(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$, entonces:*
$$\delta(f(z_1), f(z_2)) \leq \delta(z_1, z_2), \quad \forall z_1, z_2 \in \mathbb{D}$$

2. *Si $T \in \mathcal{M}$ con $T(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$, entonces:*
$$\delta(T(z_1), T(z_2)) = \delta(z_1, z_2), \quad \forall z_1, z_2 \in \mathbb{D}$$

Demostración.

1. Sea f holomorfa en $\mathbb{D}$ con $f(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$ y sean $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$.
$$\delta(z_1, z_2) = \text{ínf}\left\{\int_{\gamma} \frac{|dz|}{1 - |z|^2} : \gamma \text{ camino de } z_1 \text{ a } z_2\right\}$$
$$\delta(f(z_1), f(z_2)) = \text{ínf}\left\{\int_{\Gamma} \frac{|dw|}{1 - |w|^2} : \Gamma \text{ camino de } f(z_1) \text{ a } f(z_2)\right\}$$

   Sea γ un camino en $\mathbb{D}$ con origen z_1 y extremo z_2, con parametrización $\mathcal{C}^1$ a trozos $\gamma : [a, b] \to \mathbb{C}$. Entonces $\Gamma = f \circ \gamma : [a, b] \to \mathbb{C}$ es una parametrización $\mathcal{C}^1$ a trozos de un camino Γ en $\mathbb{D}$ con origen $f(z_1)$ y extremo $f(z_2)$. Tenemos:
$$\int_{\Gamma} \frac{|dw|}{1 - |w|^2} = \int_a^b \frac{|\Gamma'(t)|}{1 - |\Gamma(t)|^2}dt = \int_a^b \frac{|f'(\gamma(t))||\gamma'(t)|}{1 - |f(\gamma(t))|^2}dt$$

Usando la segunda parte del teorema de Schwarz-Pick:

$$\int_a^b \frac{|f'(\gamma(t))||\gamma'(t)|}{1-|f(\gamma(t))|^2}dt \leq \int_a^b \frac{|\gamma'(t)|}{1-|\gamma(t)|^2}dt = \int_\gamma \frac{|dz|}{1-|z|^2}$$

Luego tenemos que:

$$\delta(f(z_1), f(z_2)) \leq \int_\gamma \frac{|dz|}{1-|z|^2}, \quad \forall\gamma$$

Por tanto, $\delta(f(z_1), f(z_2)) \leq \gamma(z_1, z_2)$.

2. Se tiene aplicando (1) a T y T^{-1}.

□

Proposición 1.15. *Si* $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$*, entonces:*

$$\delta(z_1, z_2) = \frac{1}{2}\text{Log}\frac{1+\rho(z_1, z_2)}{1-\rho(z_1, z_2)}$$

Demostración. Si $z_1 = z_2$ es trivial. Supongamos $z_1 \neq z_2$. Consideramos:

$$S_{z_1}(z) = \frac{z - z_1}{1-\overline{z_1}z}$$

Se tiene que $S_{z_1} \in \mathcal{M}$, $S_{z_1}(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$ y $S_{z_1}(z_1) = 0$. Sabemos que $S_{z_1}(z_2) \neq 0$. Además,

$$\delta(z_1, z_2) = \delta(0, S_{z_1}(z_2))$$

Tomamos $\lambda \in \mathbb{C}$, $|\lambda| = 1$, tal que $\lambda S_{z_1}(z_2) \in (0, 1)$. Sea $r = \lambda S_{z_1}(z_2)$. Entonces:

$$\delta(z_1, z_2) = \delta(0, S_{z_1}(z_2)) = \delta(0, r)$$

Además, $r = |\lambda S_{z_1}(z_2)| = |S_{z_1}(z_2)| = \rho(z_1, z_2)$. Calculamos $\delta(0, r)$.

$$\delta(0, r) = \text{ínf}\left\{\int_\gamma \frac{|dz|}{1-|z|^2} : \gamma \text{ camino en } \mathbb{D} \text{ con origen } 0 \text{ y extremo } r\right\}$$

Si $\gamma = [0, r]$,

$$\int_\gamma \frac{|dz|}{1-|z|^2} = \int_0^r \frac{dt}{1-t^2} = \frac{1}{2}\int_0^r \left(\frac{1}{1-t} + \frac{1}{1+t}\right)dt == \frac{1}{2}\left[-\text{Log}(1-t) + \text{Log}(1+t)\right]_0^r =$$
$$= \frac{1}{2}\left[\text{Log}\frac{1+t}{1-t}\right]_0^r = \frac{1}{2}\text{Log}\frac{1+r}{1-r}$$

Luego $\delta(0, r) \leq \frac{1}{2}\text{Log}\frac{1+r}{1-r}$.

Sea γ un camino en $\mathbb{D}$ con origen 0 y extremo r. Veamos que

$$\int_\gamma \frac{|dz|}{1-|z|^2} \geq \frac{1}{2}\text{Log}\frac{1+r}{1-r}$$

Sea $\gamma : [a, b] \to \mathbb{C}$ una parametrización $\mathcal{C}^1$ a trozos de γ. Sean $u = \text{Re}(f)$ y $v = \text{Im}(f)$, de forma que $\gamma = u + iv$. $u, v : [a, b] \to \mathbb{R}$, $\mathcal{C}^1$ a trozos.

$$\int_\gamma \frac{|dz|}{1+|z|^2} = \int_a^b \frac{|\gamma'(t)|}{1-|\gamma(t)|^2}dt$$

Tenemos que:

$$\begin{cases} |\gamma(t)|^2 \geq u(t)^2 \Rightarrow 0 < 1 - |\gamma(t)|^2 \leq 1 - u(t)^2 \Rightarrow \frac{1}{1-|\gamma(t)|^2} \geq \frac{1}{1-u(t)^2} \\ |\gamma'(t)| \geq |u'(t)| \geq 0 \end{cases}$$

Así que:

$$\frac{|\gamma'(t)|}{1-|\gamma(t)|^2} \geq \frac{|u'(t)|}{1-u(t)^2} \geq \frac{u'(t)}{1-u(t)^2}$$

Luego:

$$\int_a^b \frac{|\gamma'(t)|}{1-|\gamma(t)|^2} dt \geq \int_a^b \frac{u'(t)}{1-u(t)^2} dt = \frac{1}{2}\int_a^b \left(\frac{u'(t)}{1-u(t)} + \frac{u'(t)}{1+u(t)}\right) dt =$$
$$= \frac{1}{2}\left[-\mathrm{Log}(1-u(t)) + \mathrm{Log}(1+u(t))\right]_a^b = \frac{1}{2}\left[\mathrm{Log}\frac{1+u(t)}{1-u(t)}\right]_a^b = \frac{1}{2}\mathrm{Log}\frac{1+r}{1-r}$$

porque $u(a) = 0$ y $u(b) = r$. Por tanto,

$$\delta(z_1, z_2) = \delta(0, r) = \frac{1}{2}\mathrm{Log}\frac{1+r}{1-r} = \frac{1}{2}\log\frac{1+\rho(z_1,z_2)}{1-\rho(z_1,z_2)}$$

□

Observación. Sea $h(x) = \frac{1}{2}\mathrm{Log}\frac{1+x}{1-x}$, $x \in [0,1)$. Observamos que si $x < 1$, entonces $1+x \geq 1-x > 0 \Rightarrow \frac{1+x}{1-x} \geq 1$, así que $h : [0,1) \to [0,\infty)$. h es creciente, con $h(0) = 0$ y $\lim\limits_{x\to 1^-} h(x) = \infty$. Podemos escribir $\delta = h \circ \rho : \mathbb{D}\times\mathbb{D} \xrightarrow{\rho} [0,1) \xrightarrow{h} [0,\infty)$. Fijado $a \in \mathbb{D}$, si $\{z_n\}_{n=1}^{\infty}$ está en $\mathbb{D}$ con $|z_n| \to 1$, entonces:

$$\rho(a, z_n) = |S_a(z_n)| \xrightarrow[n\to\infty]{} 1$$

Por tanto, $\delta(a, z_n) \xrightarrow[n\to\infty]{} \infty$.

$\mathbb{D}$ con esta distancia δ es un modelo de la geometría hiperbólica. Si γ es un camino en $\mathbb{D}$, la longitud de γ es

$$\int_\gamma \frac{|dz|}{1-|z|^2}$$

La geodésica que une $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$ es el camino γ para el que:

$$\delta(z_1, z_2) = \int_\gamma \frac{|dz|}{1-|z|^2}$$

Las geodésicas con respecto a δ son los diámetros de $\partial\mathbb{D}$ y los arcos de circunferencia ortogonales a $\partial\mathbb{D}$.

Capítulo 2

Familias normales

2.1. Familias normales

Teorema 2.1 (Teorema de convergencia de Weierstrass)**.** *Sea D abierto en $\mathbb{C}$ y sean $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ una sucesión de funciones holomorfas en D y $f : D \to \mathbb{C}$. Si $f_n \xrightarrow[n\to\infty]{} f$ uniformemente en cada subconjunto compacto de D, entonces f es holomorfa en D y $f_n' \xrightarrow[n\to\infty]{} f'$ uniformemente en cada subconjunto compacto. Para todo $k \in \mathbb{N}$, $f_n^{(k)} \xrightarrow[n\to\infty]{} f^{(k)}$ uniformemente en cada compacto.*

Definición 2.1. Sea D un abierto en $\mathbb{C}$ y sea $\mathcal{F}$ una familia de funciones holomorfas en D. Diremos que $\mathcal{F}$ es finitamente normal si para cada sucesión $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ en $\mathcal{F}$ existe una subsucesión $\{f_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ de $\{f_n\}$ que converge uniformemente en cada subconjunto compacto de D.

Observación. El límite f de tal subsucesión es una función holomorfa en D, pero no tiene por qué pertenecer a $\mathcal{F}$.

Definición 2.2. Sea D un abierto en $\mathbb{C}$ y sea $\mathcal{F}$ una familia de funciones holomorfas en D. Diremos que $\mathcal{F}$ es compacta si para cada sucesión $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ en $\mathcal{F}$ existe una subsucesión $\{f_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ de $\{f_n\}$ que converge uniformemente en cada subconjunto compacto de D a una función que pertenece a $\mathcal{F}$.

En el conjunto $Hol(D)$ de las funciones holomorfas en D, con D abierto en $\mathbb{C}$, se puede definir una distancia d tal que $(Hol(D), d)$ es un espacio métrico completo, y en el que:

$$f_n \xrightarrow{d} f \Leftrightarrow f_n \to f \text{ uniformemente en cada subconjunto compacto de } D$$

Si $\mathcal{F} \subset Hol(D)$, $\mathcal{F}$ es finitamente normal si y solo si $\mathcal{F}$ es relativamente compacto. Los compactos coinciden con la definición de familia compacta dada.

2.2. El teorema de Montel

Lema 2.2. *Sea D un abierto en $\mathbb{C}$ y $\mathcal{F}$ una familia de funciones holomorfas en D. Entonces son equivalentes:*

1. *$\mathcal{F}$ está uniformemente acotada en cada subconjunto compacto de D.*
2. *Para cada $a \in D$ existe $r_a > 0$ con $D(a, r_a) \subset D$ y f está uniformemente acotada en $D(a, r_a)$.*

Lema 2.3. *Sea D abierto en $\mathbb{C}$ y sean $f_n : D \to \mathbb{C}$ para $n = 1, 2, \dots$ y $f : D \to \mathbb{C}$. Entonces son equivalentes:*

1. *$f_n \to f$ uniformemente en cada subconjunto compacto de D.*
2. *Para cada $a \in D$ existe $r_a > 0$ con $D(a, r_a) \subset D$ tal que $f_n \to f$ uniformemente en $D(a, r_a)$.*

Lema 2.4. *Sean $C_1, C_2 \in \mathbb{C}$, con $C_1 \cap C_2 = \emptyset$ y $C_1, C_2 \neq \emptyset$. Si C_1 es compacto y C_2 es cerrado, entonces:*

$$dist(C_1, C_2) = \inf\{|z_1 - z_2| : z_1 \in C_1, z_2 \in C_2\} > 0$$

Observación. Si C_1 no es compacto no es cierto en general.

Lema 2.5. *Sea $A \subset \mathbb{C}$, $A \neq \emptyset$ y sea*

$$F : \mathbb{C} \to \mathbb{R},\ F(z) = dist(z, A) = \inf\{|z - a| : a \in A\}$$

Entonces F es continua y $F(z) = 0$ para todo $z \in A$. Si además A es cerrado, entonces $F(z) = \min\{|z - a| : a \in A\}$ para todo $z \in \mathbb{C}$.

Lema 2.6. *Sea $A \subset \mathbb{C}$, $A \neq \emptyset$ y sea $\varepsilon > 0$. Consideramos los conjuntos:*

$$B = \{z \in \mathbb{C} : dist(z, A) < \varepsilon\}$$
$$C = \{z \in \mathbb{C} : dist(z, A) \leq \varepsilon\}$$

Entonces B es abierto y C es cerrado, con $A \subset B \subset C$. Si además A es acotado, entonces B es acotado y C es compacto.

Proposición 2.7. *Sea D un abierto en $\mathbb{C}$ y $\mathcal{F}$ una familia de funciones holomorfas en D. Supongamos que $\mathcal{F}$ está uniformemente acotada en D. Sea K un subconjunto compacto de D. Entonces existe $A > 0$ tal que:*

$$|f(z_2) - f(z_1)| \leq A|z_2 - z_1|, \quad \forall z_1, z_2 \in K,\ \forall f \in \mathcal{F}$$

Demostración. Sea $M > 0$ tal que $|f(z)| \leq M$ para todo $z \in D$ y para toda $f \in \mathcal{F}$. Sean $K \subset D$, K compacto. Sea $d > 0$ con $d < dist(K, \mathbb{C} \setminus D)$. Si $D = \mathbb{C}$, tomamos $d > 0$ cualquiera. Sea $z_0 \in K$. Entonces $D(z_0, d) \subset D$. De hecho, podemos tomar $\varepsilon > 0$ tal que $D(z_0, d + \varepsilon) \subset D$. Dada $f \in \mathcal{F}$, por la fórmula de Cauchy,

$$f'(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{|\xi - z_0| = d} \frac{f(\xi)}{(\xi - z)^2} d\xi \quad \text{si } z \in D\left(z_0, \frac{d}{2}\right)$$

Entonces:

$$|f'(z)| \leq \frac{1}{2\pi} 2\pi \max_{|\xi - z_0| = d} \frac{|f(\xi)|}{|\xi - z|^2}$$

Podemos acotar:

$$|\xi - z| = |(\xi - z_0) + (z_0 - z)| \geq |\xi - z_0| - |z_0 - z| \geq d - \frac{d}{2} = \frac{d}{2}$$

Así que $|\xi - z|^2 \geq \frac{d^2}{4} > 0$. Luego:

$$|f'(z)| \leq d \frac{M}{d^2/4} = \frac{4M}{d}$$

Hemos probado que si $z_0 \in K$, $f \in \mathcal{F}$ y $z \in D\left(z_0, \frac{d}{2}\right) \subset D$, entonces $|f'(z)| \leq \frac{4M}{d}$.

Ahora, sean $z_1, z_2 \in K$ y $f \in \mathcal{F}$. Supongamos que $|z_1 - z_2| < \frac{d}{2}$. Si $\xi \in [z_1, z_2]$, entonces $z_2 \in D\left(z_1, \frac{d}{2}\right) \subset D$ y $|\xi - z_1| \leq |z_1 - z_2| < \frac{d}{2}$, $\xi \in D\left(z_1, \frac{d}{2}\right)$. Entonces $\xi \in D$ y $|f'(\xi)| \leq \frac{4M}{d}$. Por tanto:

$$|f(z_2) - f(z_1)| = \left| \int_{[z_1, z_2]} f'(\xi) d\xi \right| \leq |z_2 - z_1| \max_{\xi \in [z_1, z_2]} |f'(\xi)| \leq |z_2 - z_1| \frac{4M}{d}$$

Entonces, si $z_1, z_2 \in K$, $|z_1 - z_2| < \frac{d}{2}$ y $f \in \mathcal{F}$, se tiene que:

$$|f(z_2) - f(z_1)| \leq A|z_2 - z_1|$$

Ahora, si $z_1, z_2 \in K$, $|z_2 - z_1| \geq \frac{d}{2}$ y $f \in \mathcal{F}$, tenemos:

$$|f(z_2) - f(z_1)| \leq |f(z_2)| + |f(z_1)| \leq 2M = 2M\frac{d}{2}\frac{2}{d} \leq \frac{4M}{d}|z_2 - z_1| = A|z_2 - z_1|$$

$\square$

Teorema 2.8 (Teorema de Arzelá-Ascoli)**.** *Sean (X_1, d_1) y (X_2, d_2) dos espacios métricos, siendo (X_1, d_1) separable y (X_2, d_2) completo. Sea $\mathcal{F}$ una familia de aplicaciones continuas de X_1 en X_2 que verifica:*

1. *$\mathcal{F}$ es puntualmente equicontinua. Es decir, dado $x \in X_1$ se verifica que, para todo $\varepsilon > 0$, existe $\delta > 0$ tal que si $y \in X_1$ con $d_1(x, y) < \delta$, entonces $d_2(f(x), f(y)) < \varepsilon$ para toda $f \in \mathcal{F}$.*
2. *Para todo $x \in X_1$, el conjunto $\{f(x) : f \in \mathcal{F}\}$ es relativamente compacto.*

Entonces, si $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión en $\mathcal{F}$, existe una subsucesión $\{f_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ de $\{f_n\}$ que converge uniformemente en cada subconjunto compacto de X_1.

Teorema 2.9 (Teorema de Montel)**.** *Sea D un abierto en $\mathbb{C}$ y sea $\mathcal{F}$ una familia de funciones holomorfas en D. Entonces son equivalentes:*

1. *$\mathcal{F}$ es finitamente normal.*
2. *$\mathcal{F}$ está uniformemente acotada en cada subconjunto compacto de D. Es decir, para cada $K \subset D$, K compacto, existe $M_K > 0$ tal que $|f(z)| \leq M_K$ para toda $f \in \mathcal{F}$ y para todo $z \in K$.*

Demostración.

- $\Rightarrow$ Sea D abierto en $\mathbb{C}$ y sea $\mathcal{F}$ una familia de funciones holomorfas en D, con $\mathcal{F}$ finitamente normal. Supongamos por reducción al absurdo que existe $K \subset D$, K compacto, tal que $\mathcal{F}$ no está uniformemente acotada en K. Entonces existen $\{z_n\}_{n=1}^{\infty}$ en K y $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ en $\mathcal{F}$ tales que $|f_n(z_n)| \to \infty$.

  Como $\mathcal{F}$ es una familia finitamente normal, existe $\{f_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ subsucesión de $\{f_n\}$ tal que $\{f_{n_k}\}$ converge uniformemente en cada subconjunto compacto de D a una función f holomorfa en D. Como f es continua en K y K es compacto, existe $M > 0$ tal que $|f(z)| \leq M$ para todo $z \in K$. Por otro lado, como $f_{n_k} \xrightarrow[k\to\infty]{} f$ uniformemente en K, existe $k_0 \in \mathbb{N}$ tal que $k \geq k_0$, $z \in K \Rightarrow |f_{n_k}(z) - f(z)| < 1$. Entonces $|f_{n_k}(z)| \leq |f_{n_k}(z) - f(z)| + |f(z)| < 1 + M$, $z \in K$, $k \geq k_0$. En particular, $|f_{n_k}(z_{n_k})| < 1 + M$ si $k \geq k_0$. Esta es una contradicción.

- $\Leftarrow$ Sea D abierto en $\mathbb{C}$ y sea $\mathcal{F}$ una familia de funciones holomorfas en D, uniformemente acotada en cada subconjunto compacto de D. Tomamos $X_1 = D$ y $X_2 = \mathbb{C}$.

  1. Sea $z_0 \in \mathbb{C}$. Dado $\varepsilon > 0$, veamos que existe $\delta > 0$ tal que, si $z_1 \in D$, $|z_1 - z_0| < \delta$, $f \in \mathcal{F}$, entonces $|f(z_1) - f(z_0)| < \varepsilon$. Sea $R > 0$ con $\overline{D}(0, R) \subset D$. $\mathcal{F}$ está uniformemente acotada en $\overline{D}(z_0, R)$ y por tanto en $D(z_0, R)$. Sea $K = \overline{D}(z_0, \frac{R}{2})$, que es un subconjunto compacto de $D(z_0, R)$. Por la proposición anterior, existe $A > 0$ tal que

     $$|f(z_2) - f(z_1)| \leq A|z_2 - z_1|, \quad \text{si } z_1, z_2 \in K, f \in \mathcal{F}$$

     Entonces, si $\delta = \text{mín}\left(\frac{\varepsilon}{A}, \frac{R}{2}\right)$, $z_1 \in D$, $|z_1 - z_0| < \delta$ y $f \in \mathcal{F}$, entonces $z_1 \in \overline{D}(z_0, \frac{R}{2}) = K$, así que:

     $$|f(z_1) - f(z_0)| \leq A|z_1 - z_0| < A\delta \leq A\frac{\varepsilon}{A} = \varepsilon$$

  2. Sea $z \in D$. El conjunto $\{f(z) : f \in \mathcal{F}\}$ está acotado, ya que $\mathcal{F}$ está uniformemente acotada en $\{z\}$. Por tanto, su clausura es compacta.

  Entonces, por el teorema de Arzelá-Ascoli, existe una subsucesión $\{f_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ de $\{f_n\}$ que converge uniformemente en cada subconjunto compacto de D. Por tanto, $\mathcal{F}$ es finitamente normal.

$\square$

Observación.

1. Sea D un abierto en $\mathbb{C}$. Si $\mathcal{F}$ es una familia finitamente normal de funciones holomorfas en D, entonces la familia $\mathcal{F}' = \{f' : f \in \mathcal{F}\}$ es finitamente normal. En general, si $k \in \mathbb{N}$, la familia $\mathcal{F}^{(k)} = \{f^{(k)} : f \in \mathcal{F}\}$ es finitamente normal.

   Sea $\{g_n\}_{n=1}^{\infty}$ en $\mathcal{F}'$. Entonces $g_n = f_n'$, $f_n \in \mathcal{F}$. Existe $\{f_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ subsucesión de $\{f_n\}$ que converge uniformemente en cada subconjunto compacto de D a una función f holomorfa en D. Entonces $g_{n_k} = f_{n_k}' \to f'$ uniformemente en cada subconjunto compacto de D.

2. Sea D abierto en $\mathcal{C}$ y sea $\mathcal{G}$ familia finitamente normal de funciones holomorfas en D con $\mathcal{F} \subset \mathcal{G}$. Entonces $\mathcal{F}$ es finitamente normal.

3. Si $a \in \mathbb{C}$, $R > 0$ y $K \subset D(a, R)$, K compacto, entonces existe $r \in (0, R)$ tal que $K \subset \overline{D}(a, r)$.

Ejemplo.

1. $\mathcal{F} = \{f : f \text{ es entera y } |f(z)| \leq n \text{ si } |z| = n, n = 1, 2, \dots\}$. Sea $K \subset \mathbb{C}$, K compacto, y sea $f \in \mathcal{F}$. Existe $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que $K \subset \overline{D}(0, n_0)$. Además, $|f(z_0)| \leq n_0$ si $|z| = n_0$. Por el principio del máximo, $|f(z)| \leq n_0$ si $|z| \leq n_0$. En particular, $|f(z)| \leq n_0$ si $z \in K$ y $f \in \mathcal{F}$. $\mathcal{F}$ está uniformemente acotada en K. Por el teorema de Montel, $\mathcal{F}$ es finitamente normal.

2. $\mathcal{P} = \{f : f \text{ es holomorfa en } \mathbb{D}, f(0) = 1, \mathrm{Re}(f(z)) > 0\ \forall z \in \mathbb{D}\}$. Sea $K \subset \mathbb{D}$, K compacto. Si $f \in \mathcal{P}$ y $z \in K$,

   $$|f(z)| \leq \frac{1 + |z|}{1 - |z|}$$

   Existe $R \in (0, 1)$ tal que $K \subset \overline{D}(0, R)$. Entonces, si $f \in \mathcal{P}$ y $z \in K$,

   $$|f(z)| \leq \frac{1 + |z|}{1 - |z|} \leq \frac{1 + R}{1 - R}$$

   $\mathcal{P}$ está uniformemente acotada en K para todo subconjunto compacto K de $\mathbb{D}$. Por el teorema de Montel, $\mathcal{P}$ es finitamente normal.

   Observación. Si quitamos la condición $f(0) = 1$ en $\mathcal{P}$, la familia deja de ser finitamente normal. Por ejemplo, $f_n(z) = n$, $n = 1, 2, \dots$, $\{f_n : n = 1, 2, \dots\} \subset \mathcal{P}$. Si tomamos $K = \{0\}$, $\mathcal{P}$ no está uniformemente acotada en K, así que $\mathcal{P}$ no es finitamente normal.

   Recordemos que $\mathcal{P} = \{f : f \text{ es holomorfa en } \mathbb{D}, f \prec P\}$, con $P(z) = \frac{1+z}{1-z}$. Esto es un caso particular del siguiente ejemplo.

3. Sea F holomorfa en $\mathbb{D}$ y sea

   $$\mathcal{F}_F = \{f : f \text{ holomorfa en } \mathbb{D}, f \prec F\}$$

   Entonces $\mathcal{F}_F$ es finitamente normal.

4. Sean $a \in \mathbb{C}$ y $R > 0$. Sea $\mathcal{F}$ una familia finitamente normal de funciones holomorfas en $D(a, R)$. Para cada $f \in \mathcal{F}$, consideramos el desarrollo de Taylor de f centrado en a

   $$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(f)(z - a)^n, \quad z \in D(a, R)$$

   Entonces $M_n = \sup_{f \in \mathcal{F}} |a_n(f)| < \infty$ para cada n y la serie de potencias $\sum_{n=0}^{\infty} M_n (z - a)^n$ tiene radio de convergencia mayor o igual que R, y por tanto define una función holomorfa en $D(a, R)$.

Demostración. Fijado n, si $f \in \mathcal{F}$ tenemos:

$$a_n(f) = \frac{f^{(n)}(a)}{n!} \Rightarrow |a_n(f)| = \frac{|f^{(n)}(a)|}{n!}$$

La familia $\mathcal{F}^{(n)}$ es finitamente normal y por tanto está uniformemente acotada en el conjunto $\{a\}$, por lo que $\{f^{(n)}(a) : f \in \mathcal{F}\}$ está acotado. Es decir, $\sup_{f\in\mathcal{F}} |f^{(n)}(a)| < \infty$. Entonces $M_n = \sup_{f\in\mathcal{F}} |a_n(f)| = \sup_{f\in\mathcal{F}} \frac{|f^{(n)}(a)|}{n!} < \infty$. Consideramos la serie de potencias:

$$\sum_{n=0}^{\infty} M_n (z-a)^n$$

Si $r \in (0, R)$, tenemos que $\mathcal{F}$ está uniformemente acotada en $\overline{D}(a, r)$, y por tanto existe $M(r) > 0$ tal que $|f(z)| \leq M(r)$ si $z \in \overline{D}(a, r)$ y $f \in \mathcal{F}$. Si $f \in \mathcal{F}$, por la fórmula de Cauchy,

$$a_n(f) = \frac{f^{(n)}(a)}{n!} = \frac{1}{2\pi i} \int_{|z-a|=r} \frac{f(z)}{(z-a)^{n+1}} dz, \quad \text{si } r \in (0, R), n = 0, 1, 2, \ldots$$

Así que:

$$|a_n(f)| \leq \frac{1}{2\pi} 2\pi r \max_{|z-a|=r} \frac{|f(z)|}{|z-a|^{n+1}} \leq r \frac{M(r)}{r^{n+1}} = \frac{M(r)}{r^n}, \quad \text{si } r \in (0, R), n = 0, 1, 2, \ldots, f \in \mathcal{F}$$

Tomando supremo en $f \in \mathcal{F}$ tenemos que:

$$|M_n| = M_n \leq \frac{M(r)}{r^n} \Rightarrow \sqrt[n]{M_n} \leq \frac{\sqrt[n]{M(r)}}{r}, \quad \text{si } r \in (0, R), n = 0, 1, 2, \ldots$$

Por tanto:

$$\limsup_{n\to\infty} \sqrt[n]{M_n} \leq \lim_{n\to\infty} \frac{\sqrt[n]{M(r)}}{r} = \frac{1}{r}, \quad \text{si } r \in (0, R)$$

Haciendo $r \to R$,

$$\limsup_{n\to\infty} \sqrt[n]{M_n} \leq \frac{1}{R}$$

Entonces el radio de convergencia es mayor o igual que R. $\square$

5. $\mathcal{F} = \{f : f \text{ es holomorfa en } \mathbb{D} \text{ y } \int\int_{\mathbb{D}} |f(z)| dxdy \leq M\}$, siendo $M > 0$. Veamos que $\mathcal{F}$ es finitamente normal.

   Sea $K \subset \mathbb{D}$, K compacto. Tomamos $r \in (0, 1)$ con $K \subset D(0, r)$. Sea $f \in \mathcal{F}$ y $z \in K$, por la fórmula de Cauchy

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{|z|=\rho} \frac{f(\xi)}{\xi - z} d\xi = \frac{1}{2\pi i} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{f(\rho e^{i\theta})}{\rho e^{i\theta} - z} \rho d\rho, \quad r \leq \rho < 1$$

$$|f(z)| \leq \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{|f(\rho e^{i\theta})|}{|\rho e^{i\theta} - z|} \rho d\rho, \quad r \leq \rho < 1$$

$$\int_{\frac{1+r}{2}}^{1} |f(z)| d\rho \leq \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{1+r}{2}}^{1} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{|f(\rho e^{i\theta})|}{|\rho e^{i\theta} - z|} \rho d\theta d\rho = \frac{1}{2\pi} \int\int_{\frac{1+r}{2}<|w|<1} \frac{|f(w)|}{|w-z|} dxdy$$

Como $|w - z| \geq |w| - |z| > \frac{1+r}{2} - r = \frac{1-r}{2} > 0$,

$$\frac{1}{2\pi} \int\int_{\frac{1+r}{2}<|w|<1} \frac{|f(w)|}{|w-z|} dxdy \leq \frac{1}{2\pi} \frac{2}{1-r} \int\int_{\frac{1+r}{2}<|w|<1} |f(w)| dxdy \leq$$
$$\leq \frac{1}{\pi(1-r)} \int\int_{\mathbb{D}} |f(w)| dxdy \leq \frac{M}{\pi(1-r)}$$

Por otro lado,

$$\int_{\frac{1+r}{2}}^{1} |f(z)|d\rho = |f(z)|\left(1 - \frac{1+r}{2}\right) = |f(z)|\frac{1-r}{2}$$

Entonces:

$$|f(z)|\frac{1-r}{2} \leq \frac{M}{\pi(1-r)} \Rightarrow |f(z)| \leq \frac{2M}{\pi(1-r)^2}$$

Por tanto, $\mathcal{F}$ está uniformemente acotada en K.

Teorema 2.10. *Sean $a \in \mathbb{C}$ y $R > 0$. Sea $\mathcal{F}$ una familia de funciones holomorfas en $D(a, R)$. Las siguientes condiciones son equivalentes:*

1. *$\mathcal{F}$ es finitamente normal.*
2. *Existe una sucesión $\{M_n\}_{n=0}^{\infty}$ con $M_n \geq 0$ para todo n tal que la serie de potencias $\sum_{n=0}^{\infty} M_n(z-a)^n$ tiene radio de convergencia mayor o igual que R y tal que, si para cada $f \in \mathcal{F}$,*

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(f)(z-a)^n, \quad z \in D(a, r)$$

se tiene que $|a_n(f)| \leq M_n$ para todo n y para toda $f \in \mathcal{F}$.

Demostración.

- $\Rightarrow$ $M_n = \sup_{f \in \mathcal{F}} |a_n(f)|$.
- $\Leftarrow$ Sea $K \subset D(a, R)$, K compacto. Existe $r \in (0, R)$ tal que $K \subset \overline{D}(a, r)$. Si $z \in K$ y $f \in \mathcal{F}$, se tiene:

$$|f(z)| = \left|\sum_{n=0}^{\infty} a_n(f)(z-a)^n\right| \leq \sum_{n=0}^{\infty} |a_n(f)||z-a|^n \leq \sum_{n=0}^{\infty} M_n|z-a|^n \leq \sum_{n=0}^{\infty} M_n r^n < \infty$$

ya que $\sum_{n=0}^{\infty} M_n(z-a)^n$ converge para $z = a + r$. $\mathcal{F}$ está uniformemente acotada en K.

$\square$

2.3. El teorema de Stieltjes-Vitali

Teorema 2.11 (Teorema de Stieltjes-Vitali). *Sea D un dominio en $\mathbb{C}$ y $\mathcal{F}$ una familia finitamente normal de funciones holomorfas en D. Sea $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ una sucesión en $\mathcal{F}$. Si existe $A \subset D$ tal que A tiene algún punto de acumulación en D, para el que existe $\lim\limits_{n\to\infty} f_n(a) \in \mathbb{C}$ para todo $a \in A$, entonces $\{f_n\}$ converge uniformemente en cada subconjunto compacto de D.*

Demostración.

1. Veamos que $\{f_n\}$ converge puntualmente en D. Sea $z^* \in D$. Supongamos por reducción al absurdo que $\{f_n(z^*)\}$ no converge. Como $\mathcal{F}$ está uniformemente acotada en el conjunto $\{z^*\}$, tenemos que $\{f_n(z^*)\}$ está acotado. Por tanto, existen $\{f_{n_i}\}_{i=1}^{\infty}$ y $\{f_{m_i}\}_{i=1}^{\infty}$ subsucesiones de $\{f_n\}$, y $w_1, w_2 \in \mathbb{C}$ distintos, tales que $f_{n_i}(z^*) \xrightarrow[i\to\infty]{} w_1$, $f_{m_i}(z^*) \xrightarrow[i\to\infty]{} w_2$. Como $\mathcal{F}$ es finitamente normal, existen $\{g_k\}_{k=1}^{\infty}$ y $\{h_k\}_{k=1}^{\infty}$ subsucesiones de $\{f_{n_i}\}$ y $\{f_{m_i}\}$, respectivamente, que convergen uniformemente en cada subconjunto compacto de D. Sean g y h los respectivos límites. Entonces g y h son holomorfas en D. Tenemos que:

$$g_k(z^*) \xrightarrow[k\to\infty]{} w_1, \qquad g(z^*) = w_1$$

$$h_k(z^*) \xrightarrow[k\to\infty]{} w_2, \qquad h(z^*) = w_2$$

Si $a \in A$, existe $\lim\limits_{n\to\infty} f_n(a) \in \mathbb{C}$, así que $g(a) = h(a)$. g y h son holomorfas en D, $g = h$ en A y A tiene algún punto de acumulación en D. Por el teorema de identidad, $g = h$ en D. Pero $g(z^*) = w_1 \neq w_2 = h(z^*)$. Esto contradice nuestro supuesto.

2. Sea $K \subset D$, K compacto. Sea $\alpha > 0$ tal que $2\alpha < dist(K, \mathbb{C} \setminus D)$. Si $D = \mathbb{C}$, tomamos $\alpha > 0$ cualquiera. Sean $G = \{z \in \mathbb{C} : dist(z, K) < \alpha\}$ y $K_1 = \{z \in \mathbb{C} : dist(z, K) \leq \alpha\}$. G es abierto, K_1 es compacto y $K \subset G \subset K_1 \subset D$.

   Veamos que $K_1 \subset D$. Si $z \in K_1$, $dist(z, K) \leq \alpha$. Supongamos que $z \in D$. Tomamos $w \in K$ con $|z - w| < 2\alpha$. Entonces $2\alpha < dist(K, \mathbb{C} \setminus D) \leq |w - z| < 2\alpha$. Esto contradice nuestra hipótesis.

   $\mathcal{F}$ está uniformemente acotada en K_1 y por tanto en G. $K \subset G$, K compacto. Por una proposición previa, existe $A > 0$ tal que $|f(z_2) - f(z_1)| \leq A|z_2 - z_1|$ si $z_1, z_2 \in K$ y $f \in \mathcal{F}$. Vamos a ver que $\{f_n\}$ es uniformemente de Cauchy en K. Sea $\varepsilon > 0$ y sea $\delta = \frac{\varepsilon}{3A} > 0$. Tenemos que si $z_1, z_2 \in K$, $|z_1 - z_2| < \delta$ y $n \in \mathbb{N}$, entonces $|f_n(z_1) - f_n(z_2)| \leq A|z_1 - z_2| < A\delta = \frac{\varepsilon}{3}$. Consideramos la familia $\{D(z, \delta) : z \in K\}$. Como K es compacto, existen $z_1, z_2, \ldots, z_N \in K$ tales que $K \subset \bigcup_{j=1}^N D(z_j, \delta)$. Para cada $j \in \{1, \ldots, N\}$, la sucesión $\{f_n(z_j)\}_{n=1}^\infty$ es de Cauchy, ya que $\{f_n\}$ converge puntualmente en D. Por tanto, exsite $n_j \in \mathbb{N}$ tal que $n, m \geq n_j \Rightarrow |f_n(z_j) - f_m(z_j)| < \frac{\varepsilon}{3}$. Sea $n_0 = \text{máx}\{n_j : j = 1, \ldots, N\}$. Si $n, n \geq n_j$ y $z \in K$, hay que probar que $|f_n(z) - f_m(z)| < \varepsilon$. Tomamos $j \in \{1, \ldots, N\}$ con $z \in D(z_j, \delta)$.

   $$|f_n(z) - f_m(z)| \leq |f_n(z) - f_n(z_j)| + |f_n(z_j) - f_m(z_j)| + |f_m(z_j) - f_m(z)| < \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} = \varepsilon$$

□

Ejemplo. Para $x \geq 0$, tenemos que $\left(1 + \frac{x}{n}\right)^n$ es una sucesión creciente y

$$\lim_{n\to\infty} \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n = e^x$$

Veamos que $\lim\limits_{n\to\infty} \left(1 + \frac{z}{n}\right)^n = e^z$ para todo $z \in \mathbb{C}$, siendo la convergencia uniforme en cada subconjunto compacto de $\mathbb{C}$.

Sea $D = \mathbb{C}$, $f_n(z) = \left(1 + \frac{z}{n}\right)^n$, $n \in \mathbb{N}$. Cada f_n es una función entera. Veamos que $\mathcal{F}$ es finitamente normal.

Sea $K \subset \mathbb{C}$, K compacto. Tomamos $R > 0$ con $K \subset \overline{D}(0, R)$. Si $k \in K$ y $n \in \mathbb{N}$,

$$|f_n(z)| = \left|1 + \frac{z}{n}\right|^n \leq \left(1 + \frac{|z|}{n}\right)^n \leq \left(1 + \frac{R}{n}\right)^n \leq e^R$$

Sea $A = [0, 1]$. A tiene puntos de acumulación en $\mathbb{C}$ y $\lim\limits_{n\to\infty} f_n(x) = e^x$ para todo $x \in A$. Por el teorema de Stieltjes-Vitali, $\{f_n\}$ converge uniformemente en cada subconjunto compacto de $\mathbb{C}$. Sea f el límite, entonces f es entera. Si $x \in A$, $\lim\limits_{n\to\infty} f_n(x) = f(x) = e^x$. Por el teorema de identidad, $f(z) = e^z$ si $z \in \mathbb{C}$.

Teorema 2.12 (Teorema de Lindelöf)**.** *Sea f holomorfa y acotada en $\mathbb{D}$. Sea $\xi \in \partial\mathbb{D}$ y supongamos que existe el límite radial, es decir, $\lim\limits_{r\to 1^-} f(r\xi) = L \in \mathbb{C}$. Entonces para todo $\alpha \in (0, \frac{\pi}{2})$ existe el límite tangencial de f en ξ, es decir,*

$$\lim_{z\to\xi, z\in S_\alpha(\xi)} f(z) = L$$

siendo $S_\alpha(\xi)$ el vector de vértice ξ y ángulo 2α, simétrico con respecto al segmento $[0, \xi]$.

Teorema 2.13. *Sea f holomorfa y acotada en $D(1, 1)$. Supongamos que existe $\lim\limits_{x\to 0^+} f(x) = L \in \mathbb{C}$. Entonces para todo $\alpha \in (0, \frac{\pi}{2})$ existe*

$$\lim_{z\to 0, |\text{Arg}(z)|<\alpha} f(z) = L$$

Demostración. Sea $M > 0$ tal que $|f(z)| \leq M$ si $z \in D(1,1)$. Consideramos la sucesión $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$, $f_n(z) = f\left(\frac{z}{n}\right)$. Cada f_n es holomorfa en $D(1,1)$. La familia $\mathcal{F} = \{f_n : n \in \mathbb{N}\}$ está uniformemente acotada en D, porque si $z \in D$ y $n \in \mathbb{N}$ se tiene que $|f_n(z)| = \left|f\left(\frac{z}{n}\right)\right| \leq M$. Así que $\mathcal{F}$ es finitamente normal.

Sea $A = (0,1)$. Si $x \in A$, $\lim\limits_{n\to\infty} f_n(x) = \lim\limits_{n\to\infty} f\left(\frac{x}{n}\right) = L$. Por el teorema de Stieltjes-Vitali, $\{f_n\}$ converge uniformemente en cada subconjunto compacto de $D(1,1)$. Sea g el límite, entonces g es holomorfa en $D(1,1)$ y $g(x) = L$ para todo $x \in A$. Por el teorema de identidad, $g(z) = L$ para todo $z \in D(1,1)$. Hemos probado que $f_n \xrightarrow[n\to\infty]{} L$ uniformemente en cada subconjunto compacto de D.

Sea $\alpha \in (0, \frac{\pi}{2})$. Sea $K = \left\{z \in \mathbb{C} : \frac{\cos(\alpha)}{2} \leq |z| \leq \cos(\alpha), |\mathrm{Arg}(z)| \leq \alpha\right\}$. K es un subconjunto compacto de $D(1,1)$, así que $f_n \xrightarrow[n\to\infty]{} L$ uniformemente en K. Es decir, existe $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que, si $n \geq n_0$ y $z \in K$, entonces $|f_n(z) - L| < \varepsilon$.

Sea $\delta = \frac{\cos(\alpha)}{2n_0} > 0$. Sea z tal que $0 < |z| < \delta$ y $|\mathrm{Arg}(z)| < \alpha$. Observamos que $|z| < \frac{\cos(\alpha)}{2n_0} \leq \frac{\cos(\alpha)}{2}$. Tomamos n_z el primer natural para el que $n_z|z| \geq \frac{\cos(\alpha)}{2}$. Como $|z| < \frac{\cos(\alpha)}{2n_0} \Leftrightarrow n_0|z| < \frac{\cos(\alpha)}{2}$, entonces $1 \leq n_0 < n_z$. Por otro lado,

$$(n_z - 1)|z| < \frac{\cos(\alpha)}{2} \Leftrightarrow n_z|z| - |z| < \frac{\cos(\alpha)}{2} \Leftrightarrow n_z|z| < |z| + \frac{\cos(\alpha)}{2} < \frac{\cos(\alpha)}{2} + \frac{\cos(\alpha)}{2} = \cos(\alpha)$$

Así que $\frac{\cos(\alpha)}{2} \leq n_z|z| = |n_z z| < \cos(\alpha)$. Además, $|\mathrm{Arg}(n_z z)| = |\mathrm{Arg}(z)| < \alpha$. Por tanto, $n_z z \in K$. Entonces:

$$|f_{n_k}(n_z z) - L| = |f(z) - L| < \varepsilon$$

□

2.4. Teoremas de Hurwitz

Teorema 2.14 (Teorema de Rouché)**.** *Sea D un dominio simplemente conexo en $\mathbb{C}$ y sea J un camino de Jordan en D. Sean f y g funciones holomorfas en D tales que*

$$|f(z) - g(z)| < |f(z)| \quad \textit{si } z \in J$$

Entonces:

1. *$I(J) \subset D$.*
2. *Ni f ni g se anulan en J.*
3. *f y g tienen el mismo número de ceros en $I(J)$.*

Teorema 2.15 (Primer teorema de Hurwitz)**.** *Sea D un dominio en $\mathbb{C}$ y sea $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ una sucesión de funciones holomorfas y nunca nulas en D, que converge uniformemente en cada subconjunto de D a una función f. Entonces f es nunca nula en D o bien f es idénticamente nula en D.*

Demostración. Si $f \equiv 0$ en D, no hay nada que hacer. Supongamos que $f \not\equiv 0$ en D. Supongamos por reducción al absurdo que existe $a \in D$ con $f(a) = 0$. Entonces a es un cero aislado de f. Podemos tomar $R > 0$ tal que $D(a, 2R) \subset D$ y f no tiene ceros en $D(a,2R) \setminus \{a\}$.

Sea C_R la circunferencia $|z - a| = R$. Como f no tiene ceros en C_R, existe $\alpha > 0$ tal que $|f(z)| > \alpha$ para todo $z \in C_R$. Como $f_n \to f$ uniformemente en C_R, existe $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que $n \geq n_0, z \in C_R \Rightarrow |f_n(z) - f(z)| < \alpha$. Entonces, si $n \geq n_0$ y $z \in C_R$, se tiene que

$$|f_n(z) - f(z)| < \alpha < |f(z)|$$

Por el teorema de Rouché, f_n y f tienen el mismo número de ceros en $D(a,R)$. Pero f_n es nunca nula en D, por lo que no tiene ceros en $D(a,R)$, mientras que $f(a) = 0$. Esta es una contradicción. Entonces f es nunca nula en D. □

Teorema 2.16 (Segundo teorema de Hurwitz). *Sea D un dominio en $\mathbb{C}$ y sea $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ una sucesión de funciones holomorfas e inyectivas en D. Si $\{f_n\}$ converge uniformemente a f en cada subconjunto compacto de D, entonces f es inyectiva o constante.*

Demostración. Sabemos que f es holomorfa en D. Supongamos que f no es constante. Sean $a, b \in D$ con $a \neq b$. Veamos que $f(a) \neq f(b)$. $D \setminus \{a\}$ es un dominio en $\mathbb{C}$. Para cada $n \in \mathbb{N}$, sea $g_n(z) = f_n(z) - f_n(a)$ si $z \in D \setminus \{a\}$. Cada g_n es holomorfa y nunca nula en $D \setminus \{a\}$. $f_n \to f$ uniformemente en cada subconjunto compacto de D. Sea $g(z) = f(z) - f(a)$, $z \in D \setminus \{a\}$. Entonces $g_n \to g$ uniformemente en cada subconjunto compacto de $D \setminus \{a\}$. Por el teorema anterior, $g \equiv 0$ en $D \setminus \{a\}$ o bien g es nunca nula en $D \setminus \{a\}$.

1. Si $g \equiv 0$ en $D \setminus \{a\}$, entonces $f(z) = f(a)$ si $z \in D \setminus \{a\} \Rightarrow f(z) = f(a)$ si $z \in D$. f es constante, lo que contradice nuestra hipótesis.

2. Si $g(z) \neq 0$ si $z \in D \setminus \{a\}$, en particular $g(b) = f(b) - f(a) \neq 0 \Rightarrow f(a) \neq f(b)$.

$\square$

Capítulo 3

El teorema de Riemann de la aplicación conforme

3.1. Preliminares

Recordemos algunos conceptos y resultados.

Definición 3.1. Sea D un dominio en $\mathbb{C}$ y sea f una función holomorfa en D.

- g es una rama de $\sqrt{f}$ en D si $g : D \to \mathbb{C}$ es una función continua tal que $g(z)^2 = f(z)$ para todo $z \in D$.
- g es una rama de $\log(f)$ en D si $g : D \to \mathbb{C}$ es una función continua tal que $e^{g(z)} = f(z)$ para todo $z \in D$.

Proposición 3.1. *Sean D un dominio en $\mathbb{C}$ y f una función holomorfa y nunca nula en D.*

1. *Si g es una rama de $\sqrt{f}$ en D, entonces g es holomorfa en D y $g'(z) = \frac{f'(z)}{2g(z)}$ para todo $z \in D$.*
2. *Si g es un rama de $\log(f)$ en D, entonces g es holomorfa en D y $g'(z) = \frac{f'(z)}{f(z)}$ para todo $z \in D$.*
3. *Existe una rama de $\log(f)$ en D si y solo si $\frac{f'}{f}$ tiene primitiva en D.*

Proposición 3.2. *Sean D un dominio en $\mathbb{C}$ y $f : D \to \mathbb{C}$ una función continua en D. Entonces f tiene primitiva en D si y solo si $\int_\gamma f(z)dz = 0$ para todo camino cerrado γ en D.*

Definición 3.2. Si D es un dominio en $\mathbb{C}$ y Γ es un ciclo en D, se dice que Γ es homólogo a cero módulo D, y se denota $\Gamma \sim 0(modD)$, si $n(\Gamma, a) = 0$ para todo $a \in \mathbb{C} \setminus D$.

Teorema 3.3 (Versión general del teorema de Cauchy)**.** *Sea D un dominio en $\mathbb{C}$ y sea Γ un ciclo en D. Las dos siguientes condiciones son equivalentes:*

1. *$\Gamma \sim 0(modD)$.*
2. *$\int_\Gamma f(z)dz = 0$ para toda función f holomorfa en D.*

3.2. Dominios simplemente conexos

Definición 3.3. Si D es un dominio en $\mathbb{C}$, se dice que D es simplemente conexo si $\mathbb{C}^* \setminus D$ es conexo.

Hay una serie de caracterizaciones para los dominios simplemente conexos, que se pueden deducir de los resultados anteriores.

Teorema 3.4. *Sea D un dominio en $\mathbb{C}$. Las siguientes condiciones son equivalentes:*

1. *D es simplemente conexo.*
2. *Todo ciclo en D es homólogo a cero módulo D.*
3. *Todo camino cerrado en D es homólogo a cero módulo D.*
4. *$\int_\Gamma f(z)dz = 0$ para toda f holomorfa en D y para todo ciclo Γ en D.*
5. *$\int_\gamma f(z)dz = 0$ para toda f holomorfa en D y para todo camino cerrado γ en D.*
6. *Toda función holomorfa en D tiene primitiva.*
7. *Para toda función f holomorfa y nunca nula en D, existe una rama de $\log(f)$ en D.*
8. *Para toda función f holomorfa y nunca nula en D, existe una rama de $\sqrt{f}$ en D.*

Recordamos que:

- Dos dominios D_1 y D_2 en $\mathbb{C}^*$ son conformemente equivalentes si existe una aplicación conforme f de D_1 sobre D_2.
- En el conjunto de los dominios en $\mathbb{C}^*$, el ser conformemente equivalentes es una relación de equivalencia.
- Si D_1 y D_2 son dos dominios en $\mathbb{C}^*$ que son conformemente equivalentes, entonces D_1 es simplemente conexo si y solo si D_2 es simplemente conexo.
- $\mathbb{C}^*$, $\mathbb{C}$ y el disco unidad $\mathbb{D} = \{z \in \mathbb{C} : |z| < 1\}$ son tres dominios simplemente conexos en $\mathbb{C}^*$, que no son conformemente equivalentes.
- El único dominio en $\mathbb{C}^*$ conformemente equivalente a $\mathbb{C}^*$ es $\mathbb{C}^*$.

Vamos a ver que, además de $\mathbb{C}*$, $\mathbb{C}$ y $\mathbb{D}$, no hay más dominios simplemente conexos en $\mathbb{C}^*$ módulo la relación de equivalencia. Es decir, si D es un dominio simplemente conexo en $\mathbb{C}^*$, entonces D es conformemente equivalente a uno de los tres: $\mathbb{C}^*$, $\mathbb{C}$ o $\mathbb{D}$. Por tanto se tendrá que, si D es un dominio simplemente conexo en $\mathbb{C}$, con $D \neq \mathbb{C}$, entonces D es conformemente equivalente a $\mathbb{D}$.

Definición 3.4. Sea D un dominio en $\mathbb{C}^*$. Llamamos automorfismos de D a aquellas aplicaciones conformes de D sobre D. El conjunto de todos los automorfismos de D se denota $Aut(D)$, y tiene estructura de grupo con la composición.

Tenemos que

$$\begin{aligned}
Aut(\mathbb{C}^*) &= \mathcal{M}\\
Aut(\mathbb{C}) &= \{f_{\alpha,\beta} : f_{\alpha,\beta}(z) = \alpha z + \beta, \alpha, \beta \in \mathbb{C}, \alpha \neq 0\} = \{T \in \mathcal{M} : T(\mathbb{C}) = \mathbb{C}\}\\
Aut(\mathbb{D}) &= \{\lambda T_a : \lambda \in \mathbb{C}, |\lambda| = 1, a \in \mathbb{D}\} = \{T \in \mathcal{M} : T(\mathbb{D}) = \mathbb{D}\}
\end{aligned}$$

Ejemplo. Veamos algunos ejemplos de dominios en $\mathbb{C}$ para los que podemos encontrar una aplicación conforme del dominio sobre $\mathbb{D}$.

1. Un disco abierto, $D(a, R)$, $a \in \mathbb{C}, R > 0$.

$$\begin{aligned}
\mathbb{D} &\to D(a, R)\\
z &\mapsto a + rz
\end{aligned}$$

2. Un semiplano.

$$\begin{aligned}
\mathbb{D} &\to \mathbb{H} = \{z \in \mathbb{C} : \mathrm{Re}(z) > 0\}\\
z &\mapsto P(z)
\end{aligned}$$

donde $P(z) = \frac{1+z}{1-z}$, es una aplicación conforme.

Componiendo con una rotación y una traslación, vemos que $\mathbb{D}$ es conformemente equivalente a cualquier semiplano.

$$\begin{aligned} \mathbb{D} &\to \mathbb{C} \\ z &\mapsto a + e^{i\theta} P(z) \end{aligned}$$

con $a \in \mathbb{C}$ y $\theta \in \mathbb{R}$.

3. El exterior de un disco, $\{z \in \mathbb{C} : |z-a| > R\} \cup \{\infty\}$, $a \in \mathbb{C}, R > 0$.

$$\begin{aligned} D(a,R) &\to \{z \in \mathbb{C} : |z-a| > R\} \cup \{\infty\} \\ z &\mapsto \frac{1}{z} \end{aligned}$$

4. El plano menos una semirrecta, $\mathbb{C} \setminus \{a + re^{i\theta}, r \geq 0\}$, $a \in \mathbb{C}, \theta \in \mathbb{R}$.

$$\begin{aligned} \mathbb{H} &\to \mathbb{C} \setminus (-\infty, 0] \\ z &\mapsto z^2 \end{aligned}$$

es una aplicación conforme. Así que

$$\begin{aligned} \mathbb{H} &\to \mathbb{C} \setminus (-\infty, 0] \\ z &\mapsto P(z)^2 = \left(\frac{1+z}{1-z}\right)^2 \end{aligned}$$

es una aplicación conforme.

Componiendo con una rotación y una traslación, vemos que $\mathbb{D}$ es conformemente equivalente al plano menos una semirrecta cualquiera.

5. La función exponencial no es inyectiva.

$$z = x + iy_0 \mapsto e^z = e^{x+iy_0} = e^x(\cos(y_0) + i\sin(y_0))$$

Es inyectiva en cualquier banda horizontal abierta de amplitud menor o igual que 2π. Por ejemplo,

$$\exp : \left\{z \in \mathbb{C} : |\mathrm{Im}(z)| < \frac{\pi}{2}\right\} \to \mathbb{H}$$

es una aplicación conforme. Como $\mathbb{H}$ es conformemente equivalente a $\mathbb{D}$, tenemos que esta banda es conformemente equivalente a $\mathbb{D}$.

Componiendo con el producto por un número real, una rotación y una traslación, vemos que $\mathbb{D}$ es conformemente equivalente a cualquier banda.

6. Sectores.

$$\left\{z \in \mathbb{C} : |\mathrm{Im}(z)| < \frac{\alpha}{2}\right\} \xrightarrow{\exp} S$$

donde S es el sector de vértice 0 y amplitud α, es una aplicación conforme.

7. $\mathbb{D}^+ = \{z \in \mathbb{D} : \mathrm{Im}(z) > 0\}$.

$$\mathbb{D}^+ \xrightarrow{P} \{z \in \mathbb{C} : \mathrm{Re}(z) > 0, \mathrm{Im}(z) > 0\}$$

es una aplicación conforme. El dominio $\{z \in \mathbb{C} : \mathrm{Re}(z) > 0, \mathrm{Im}(z) > 0\}$ es un sector, así que es conformemente equivalente a $\mathbb{D}$.

3.3. El teorema de Riemann de la aplicación conforme

Teorema 3.5 (Teorema de Riemann de la aplicación conforme)**.** *Sea D un dominio simplemente conexo en $\mathbb{C}$ con $D \neq \mathbb{C}$ y sea $z_0 \in D$. Entonces existe una única aplicación conforme f de D sobre $\mathbb{D}$ tal que $f(z_0) = 0$ y $f'(z_0) > 0$.*

Observación.

1. Existen infinitas aplicaciones conformes de D sobre $\mathbb{D}$. Basta cambiar el punto z_0 o componer con una rotación.
2. Para la demostración, las condiciones
   a) D simplemente conexo.
   b) $D \neq \mathbb{C}$.

   solo las vamos a utilizar para deducir que:
   - $\mathbb{C} \setminus D$ tiene más de un punto.
   - Si h es holomorfa y nunca nula en D, existe una rama de $\sqrt{h}$ en D.

Teorema 3.6. *Sea D un dominio en $\mathbb{C}$ tal que:*

1. $\mathbb{C} \setminus D$ tiene más de un punto.

2. Para toda función h holomorfa y nunca nula en D, existe una rama de $\sqrt{h}$ en D.

Sea $z_0 \in D$. Entonces existe una única aplicación conforme f de D sobre $\mathbb{D}$ tal que $f(z_0) = 0$ y $f'(z_0) > 0$.

Demostración. Sea $\mathcal{F} = \{f : f \text{ es holomorfa e inyectiva en } D, f(D) \subset \mathbb{D}, f(z_0) = 0\}$.

1. Veamos que $\mathcal{F} \neq \emptyset$. Por (1), existen $a, b \in \mathbb{C} \setminus D$ con $a \neq b$. Sea $\varphi(z) = \frac{z-a}{z-b}$, $z \in D$.

$$\begin{vmatrix} 1 & -a \\ 1 & -b \end{vmatrix} = -b + a \neq 0 \Rightarrow \varphi \in \mathcal{M}$$

   φ es holomorfa e inyectiva en D y φ es nunca nula en D, porque $a, b \notin D$. Por (2), existe ψ rama de $\sqrt{\varphi}$ en D. ψ es holomorfa e inyectiva en D y ψ es nunca nula.

   Además, se tiene que si $w \in \psi(D)$, entonces $-w \notin \psi(D)$. Veámoslo. Supongamos que $w \in \psi(D)$ y $-w \in \psi(D)$. Entonces:

$$\begin{aligned} w &= \psi(z_1), \quad z_1 \in D \\ -w &= \psi(z_2), \quad z_2 \in D \end{aligned}$$

$$\psi(z_1)^2 = w^2 = (-w)^2 = \psi(z_2)^2 \Leftrightarrow \varphi(z_1) = \varphi(z_2) \Leftrightarrow z_1 = z_2 \Leftrightarrow w = -w \Leftrightarrow w = 0 \in \psi(D)$$

   Sin embargo, ψ es nunca nula en D.

   Tomamos $w_0 \in \psi(D)$. Como $\psi(D)$ es abierto, existe $r > 0$ tal que $\overline{D}(0, r) \subset \psi(D)$. Entonces, si $z \in D$ se tiene que $\psi(z) \in \psi(D)$ y por tanto $-\psi(z) \notin \psi(D)$, de manera que $-\psi(z) \notin \overline{D}(w_0, r)$. Es decir,

$$|-\psi(z) - w_0| > r \Leftrightarrow |\psi(z) + w_0| > r > 0 \Leftrightarrow \frac{r}{|\psi(z) + w_0} < 1$$

   Sea $h(z) = \frac{r}{\psi(z)+w_0}$, $z \in D$. h es holomorfa e inyectiva en D y $|h(z)| < 1$ para todo $z \in D$, luego $h(D) \subset \mathbb{D}$. Consideramos la transformación de Möbius $S_{h(z_0)}(z) = \frac{z-h(z_0)}{1-\overline{h(z_0)}z}$. Sabemos que $S_{h(z_0)}(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$ y $S_{h(z_0)}(h(z_0)) = 0$. Por tanto, $f = S_{h(z_0)} \circ h \in \mathcal{F}$.
2. $\mathcal{F}$ está uniformemente acotada en D. Por el teorema de Montel, $\mathcal{F}$ es finitamente normal.

3. Sea $M = \sup_{f\in\mathcal{F}} |f'(z_0)|$, $0 \le M \le \infty$. Si $f \in \mathcal{F}$, f es holomorfa e inyectiva en D, por lo que $f'(z_0) \neq 0$. Entonces $M \neq 0$. Como $\mathcal{F}' = \{f' : f \in \mathcal{F}\}$ es finitamente normal, entonces está uniformemente acotada en $\{z_0\}$. Entonces $\{f'(z_0) : f \in \mathcal{F}\}$ está acotado, así que $M = \sup_{f\in\mathcal{F}} |f'(z_0)| < \infty$. Por tanto, $0 < M < \infty$.

   Tomamos una sucesión $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ en $\mathcal{F}$ tal que $\lim\limits_{n\to\infty} |f_n'(z_0)| = M$. Como $\mathcal{F}$ es finitamente normal, existe $\{f_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ subsucesión de $\{f_n\}$ que converge a una función F uniformemente en cada subconjunto comapcto de D. Entonces F es holomorfa en D y cada f_{n_k} es holomorfa e inyectiva en D. Por el segundo teorema de Hurwitz, F es inyectiva o constante. Como $f_{n_k}' \to F'$ uniformemente en cada subconjunto compacto de D, se tiene que $f_{n_k}'(z_0) \to F'(z_0)$, así que $|f_{n_k}'(z_0)| \to |F'(z_0)| = M > 0$. Luego F no es constante. Entonces F es inyectiva. Además, $F(z_0) = \lim\limits_{k\to\infty} f_{n_k}(z_0) = 0$ porque $f_{n_z}(z_0) = 0$. Si $z \in D$, $F(z) = \lim\limits_{k\to\infty} f_{n_k}(z)$, así que $|F(z)| = \lim\limits_{k\to\infty} |f_{n_z}(z)| \le 1$ porque $|f_{n_z}(z)| < 1$. Pero si $|F(z)| = 1$ para algún $z \in D$, por el principio del máximo F sería constante, lo cual es imposible. Por tanto, $|F(z)| < 1$ para todo $z \in D$, luego $F(D) \subset \mathbb{D}$. Entonces $F \in \mathcal{F}$ y $|F'(z_0)| = M$.

4. Veamos que $F(D) = \mathbb{D}$. Supongamos por reducción al absurdo que existe $\alpha \in \mathbb{D} \setminus F(D)$. Consideramos $S_\alpha(z) = \frac{z-\alpha}{1-\bar{\alpha}z}$ transformación de Möbius con $S_\alpha(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$ y $S_\alpha(\alpha) = 0$. Sea $h = S_\alpha \circ F$. h es holomorfa e inyectiva en D. Además, h es nunca nula en D y $h(D) \subset \mathbb{D}$. Por (2), existe g una rama de $\sqrt{h}$ en D, es decir, $g^2 = h$ en D. g es holomorfa, inyectiva y nunca nula en D, con $g(D) \subset \mathbb{D}$. Sea $G = S_{g(z_0)} \circ g$. G es holomorfa e inyectiva en D, con $G(D) \subset \mathbb{D}$ y $G(z_0) = 0$. Por tanto, $G \in \mathcal{F}$.

   Calculemos $|G'(z_0)|$.
   $$G'(z_0) = g'(z_0) S_{g(z_0)}'(g(z_0))$$
   En primer lugar, hallamos la derivada de S_a.
   $$S_a'(z) = \frac{1 - \bar{a}z + (z-a)\bar{a}}{(1-\bar{a}z)^2} = \frac{1-|a|^2}{(1-\bar{a}z)^2}$$
   Observamos que $S_a'(a) = \frac{1}{1-|a|^2}$ y $S_a'(0) = 1 - |a|^2$. Así que:
   $$G'(z_0) = g'(z_0)\frac{1}{1-|g(z_0)|^2} \Rightarrow |G'(z_0)| = \frac{|g'(z_0)|}{1-|g(z_0)|^2}$$
   Como $g^2 = h$ en D, también tenemos que $2gg' = h$ en D. Luego $|g(z_0)|^2 = |h(z_0)|$ y $2|g(z_0)||g'(z_0)| = |h'(z_0)|$. Entonces:
   $$|G'(z_0)| = \frac{|h'(z_0)|}{2|g(z_0)|}\frac{1}{1-|g(z_0)|^2} = \frac{|h'(z_0)|}{2\sqrt{|h(z)|}}\frac{1}{1-|h(z_0)|}$$
   Calculamos también:
   $$\begin{aligned} h'(z_0) &= F'(z_0)S_\alpha'(F(z_0)) = F'(z_0)S_\alpha'(0) = F'(z_0)(1-|\alpha|^2) \\ h(z_0) &= S_\alpha(F(z_0)) = S_\alpha(0) = -\alpha \Rightarrow |h(z_0)| = |\alpha| \end{aligned}$$
   Por tanto:
   $$|G'(z_0)| = \frac{|F'(z_0)|(1-|\alpha|^2)}{2\sqrt{|\alpha|}(1-|\alpha|)} = M\frac{1-|\alpha|^2}{2\sqrt{|\alpha|}(1-|\alpha|)} = M\frac{1+|\alpha|}{2\sqrt{|\alpha|}}$$
   Veamos que $\frac{1+|\alpha|}{2\sqrt{|\alpha|}} > 1$.
   $$\frac{1+|\alpha|}{2\sqrt{|\alpha|}} > 1 \Leftrightarrow 1 + |\alpha| > 2\sqrt{|\alpha|} \Leftrightarrow 1 + \alpha - 2\sqrt{|\alpha|} > 0 \Leftrightarrow (1-\sqrt{|\alpha|})^2 > 0 \Leftrightarrow 1 - \sqrt{|\alpha|} \neq 0 \Leftrightarrow$$
   $$\Leftrightarrow \sqrt{|\alpha|} \neq 1 \Leftrightarrow |\alpha| \neq 1$$
   Como $\alpha \in \mathbb{D}$, la desigualdad se cumple. Por tanto, $|G'(z_0)| > M$, con $G \in \mathcal{F}$ y $M = \sup_{f\in\mathcal{F}} |f'(z_0)|$, luego llegamos a contradicción. Entonces, $F(D) = \mathbb{D}$.

5. Tenemos $F \in \mathcal{F}$, $|F'(z_0)| = M$ y $F(D) = \mathbb{D}$. F es una aplicación conforme de D sobre $\mathbb{D}$ con $F(z_0) = 0$. Falta que $F'(z_0) > 0$.

   Queremos encontrar $\lambda \in \mathbb{C}$ con $|\lambda| = 1$ tal que $f = \lambda F$ verifique que $f'(z_0) > 0$.

   $$f'(z_0) = \lambda F'(z_0) > 0 \Leftrightarrow f'(z_0) = |\lambda||F'(z_0)| = |F'(z_0)| = M \Rightarrow \lambda = \frac{M}{F'(z_0)}$$

   Sea $\lambda = \frac{M}{F'(z_0)} \in \mathbb{C}$, con $|\lambda| = \frac{M}{|F'(z_0)|} = 1$, $F'(z_0) \neq 0$. Sea $f = \lambda F$. f es holomorfa e inyectiva en D, con $f(D) = \mathbb{D}$, $f(z_0) = 0$ y $f'(z_0) = \lambda F'(z_0) = \frac{M}{F'(z_0)} F'(z_0) = M > 0$.

6. Veamos que esta aplicación conforme es única. Supongamos $f_1, f_2 : D \to \mathbb{D}$ aplicación conforme, con $f_j(z_0) = 0$, $f_j'(z_0) > 0$. Sea $g = f_1 \circ f_2^{-1}$.

   $$g : \mathbb{D} \xrightarrow{f_2^{-1}} D \xrightarrow{f_1} \mathbb{D}$$

   g es una aplicación conforme de $\mathbb{D}$ sobre $\mathbb{D}$, así que es de la forma

   $$g(z) = \lambda T_a(z) = \lambda \frac{z + a}{1 + \bar{a} z}, \quad \lambda \in \mathbb{C},\ |\lambda| = 1,\ a \in \mathbb{D}$$

   Como $g(0) = 0$,

   $$g(0) = \lambda a = 0 \Rightarrow a = 0 \Rightarrow g(z) = \lambda z$$

   Como $g \circ f_2 = f_1$ en D,

   $$f_2'(z_0) g'(f_2(z_0)) = f_1'(z_0) \Leftrightarrow f_2'(z_0) g'(0) = f_1'(z_0) \Leftrightarrow g'(0) = \frac{f_1'(z_0)}{f_2'(z_0)} > 0$$

   Como $g'(0) = \lambda > 0$ y $|\lambda| = 1$, entonces $\lambda = 1$. Por tanto, $g(z) = z \Leftrightarrow f_1 = f_2$.

$\square$

Otros enunciados equivalentes

Teorema 3.7 (Teorema de Riemann)**.** *Sea D un dominio simplemente conexo en $\mathbb{C}$ con $D \neq \mathbb{C}$ y sea $z_0 \in D$. Entonces existe una única aplicación conforme de $\mathbb{D}$ sobre D tal que $f(0) = z_0$ y $f'(0) > 0$.*

Teorema 3.8 (Teorema de Riemann: enunciado equivalente)**.** *Sea D un dominio simplemente conexo en $\mathbb{C}$ con $D \neq \mathbb{C}$ y sea $z_0 \in D$. Entonces existe un único $R > 0$ tal que existe una aplicación conforme f de D sobre $D(0, R)$ con $f(z_0) = 0$ y $f'(z_0) = 1$. Además, esta f es única.*

A este número R se le denomina radio conforme interior a D en z_0 y se denota $r(D, z_0)$.

Demostración. Este enunciado es equivalente al teorema de Riemann. Si D es un dominio simplemente conexo en $\mathbb{C}$ con $D \neq \mathbb{C}$ y $z_0 \in D$.

1. Si $f : D \to \mathbb{D}$ aplicación conforme, $f(z_0) = 0$ y $f'(z_0) > 0$, entonces si $R = \frac{1}{f'(z_0)} > 0$ se tiene que $g = Rf : D \to D(0, R)$ es una aplicación conforme con $g(z_0) = 0$ y $g'(z_0) = 1$.
2. Si $R > 0$, $g : D \to D(0, R)$ es una aplicación conforme con $g(z_0) = 0$ y $g'(z_0) = 1$, entonces $f = \frac{1}{R} g : D \to \mathbb{D}$ es una aplicación conforme con $f(z_0) = 0$ y $f'(z_0) = \frac{1}{R} g'(z_0) = \frac{1}{R} > 0$.

$\square$

Observación. Hemos visto que cualquier dominio D simplemente conexo en $\mathbb{C}$ con $D \neq \mathbb{C}$ es conformemente equivalente a $\mathbb{D}$. Entonces, si D_1 y D_2 son dominios simplemente conexos en $\mathbb{C}$ con $D_1, D_2 \neq \mathbb{C}$, D_1 y D_2 son conformemente equivalentes.

En $\mathbb{C}^*$ tenemos el siguiente resultado.

Teorema 3.9. *Sea D un dominio simplemente conexo en $\mathbb{C}^*$ tal que $\mathbb{C}^* \setminus D$ tiene más de un punto. Entonces D es conformemente equivalente a $\mathbb{D}$.*

Demostración.

- Si $D \subset \mathbb{C}$, entonces D es un dominio simplemente conexo en $\mathbb{C}$ con $D \neq \mathbb{C}$, ya que $\mathbb{C}^* \setminus D$ tiene más de un punto. Entonces D es conformemente equivalente a $\mathbb{D}$.

- Si $\infty \in D$, entonces tomamos $a, b \in \mathbb{C}^* \setminus D$ con $a \neq b$. Entonces $a, b \in \mathbb{C} \setminus D$. Sea $T(z) = \frac{1}{z-a}$, $z \in \mathbb{C} \setminus \{a\}$, con $T(a) = \infty$ y $T(\infty) = 0$. $T : \mathbb{C}^* \to \mathbb{C}*$ es una aplicación conforme. Entonces $D \xrightarrow{T} T(D) = D'$ es una aplicación conforme y D' es un dominio simplemente conexo en $\mathbb{C}^*$.

  Como $a, b \notin D$, $T(a) = \infty \notin D'$, así que D' es un dominio en $\mathbb{C}$. Además, $T(b) \notin D'$ con $T(b) \in \mathbb{C}$, luego $D \neq \mathbb{C}$. D' es un dominio simplemente conexo en $\mathbb{C}$, con $D' \neq \mathbb{C}$. Por tanto, D' es conformemente equivalente a $\mathbb{D}$. Como D' es conformemente equivalente a D, entonces D es conformemente equivalente a $\mathbb{D}$.

$\square$