

La conjetura de Poincaré en dimensiones altas

Notas

github.com/danimalabares/cohom

August 10, 2023

Índice

Índice	2
1 Álgebra homológica	3
1.1 Repaso	3
1.2 Más álgebra homológica	6
1.3 Funtores derivados	7

1. Álgebra homológica

1.1 Repaso

Sea R un anillo asociativo con 1. Podemos ahora tomar la categoría de R -módulos, $R\text{-mod}$, cuyos objetos son R -módulos y los morfismos son homomorfismos R -lineales. También podemos construir $R\text{-ch-comp}$, cuyos objetos son complejos de cadenas,

$$\cdots \xrightarrow{\partial_{n+1}} C_n \xrightarrow{\partial_n} C_{n-1} \xrightarrow{\partial_{n-1}} \cdots$$

tales que $\partial_{n-1} \circ \partial_n = 0$, es decir, $\text{img } \partial_n \subseteq \ker \partial_{n-1}$. y sus morfismos son morfismos complejos de cadenas, $C_\bullet \xrightarrow{f} D_\bullet$, que son muchos morfismos tales que el siguiente diagrama conmuta en todos los cuadraditos:

$$\begin{array}{ccccccc} \cdots & \longrightarrow & C_{n+1} & \xrightarrow{\partial_{n+1}} & C_n & \xrightarrow{\partial_n} & C_{n-1} \longrightarrow \cdots \\ & & \downarrow f_{n+1} & & \downarrow f_n & & \downarrow f_{n-1} \\ \cdots & \longrightarrow & D_{n+1} & \xrightarrow{\delta_n} & D_n & \xrightarrow{\delta_n} & D_{n-1} \longrightarrow \cdots \end{array}$$

Y definimos

$$H_n(C_\bullet) = \frac{\ker \partial_n}{\text{img } \partial_{n+1}}$$

Definición.

- Decimos que C_\bullet es **acíclico** si $H_n(C_\bullet) = 0$ para toda n .
- La sucesión $C_1 \xrightarrow{\varphi} C_2 \xrightarrow{\psi} C_3$ es **exacta** si $\text{img } \varphi = \ker \psi$.
- La sucesión $0 \rightarrow C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_3 \rightarrow 0$ es una **sucesión exacta corta**.
- Y si se extiende infinitamente, es una **sucesión exacta larga**.

Proposición. En una sucesión exacta corta, φ es inyectiva, ψ es suprayectiva y $C_3 \approx C_2 / \ker \psi$. Abusando de notación, podemos pensar que $C_3 \approx C_2 / C_1$, pero hay que tener cuidado aquí porque el encaje de C_1 en C_2 puede no ser único.

Tomemos n fijo. Entonces

$$\begin{array}{ccc} & & \text{Ab} \\ & \nearrow & \uparrow \\ \text{R-ch-comp} & \xrightarrow{H_n} & \text{R-mod} \\ C_\bullet & \longmapsto & H_n(C_\bullet) \end{array}$$

Y como los morfismos de cadenas mandan ciclos en ciclos y fronteras en fronteras, podemos definir los morfismos inducidos, que satisfacen que $(fg)_* = f_*g_*$ y $id_{C_\bullet} = id_{H_n(C_\bullet)}$. Como la composición de morfismos se abre en el mismo orden en el que estaba, se llama **functor covariante**.

Definición. Dos homomorfismos

$$f, g : (C_\bullet, \partial) \rightarrow (C'_\bullet, \partial')$$

son **homotópicos** si existen homomorfismos $h_n : C_n \rightarrow C'_{n+1}$ para toda $p \in \mathbb{Z}$ tales que

$$f_n - g_n = \partial'_{n+1} h_n + h_{n-1} \partial_n$$

Estas flechas se pueden visualizar aquí:

$$\begin{array}{ccccccc} \cdots & \longrightarrow & C_{n+1} & \xrightarrow{\partial_{n+1}} & C_n & \xrightarrow{\partial_n} & C_{n-1} \longrightarrow \cdots \\ & & \downarrow f_{n+1}-g_{n+1} & \swarrow h_p & \downarrow f_n-g_n & \swarrow h_{n-1} & \downarrow f_{n-1}-g_{n-1} \\ \cdots & \longrightarrow & C'_{n+1} & \xrightarrow{\partial'_{n+1}} & C'_n & \xrightarrow{\partial'_n} & C'_{n-1} \longrightarrow \cdots \end{array}$$

Así que la suma de las flechas azules es igual a la flecha roja. (No estamos diciendo que el diagrama sea conmutativo).

Esto es tanto como decir que $H_n(f) = H_n(g)$ para toda n . Es decir, funciones homotópicas inducen los mismos homomorfismos entre complejos de cadenas.

Teorema (fundamental del álgebra homológica). Si

$$0 \rightarrow A_\bullet \xrightarrow{\phi} B_\bullet \xrightarrow{\psi} C_\bullet \rightarrow 0$$

es una sucesión exacta corta de complejos de cadena, entonces existen homomorfismos

$$\delta_{*p} : H_p(C_\bullet) \rightarrow H_{p-1}(A_\bullet)$$

tales que la sucesión

$$\cdots \rightarrow H_p(A_\bullet) \xrightarrow{\bar{\phi}_p} H_p(B_\bullet) \xrightarrow{\bar{\psi}_p} H_p(C_\bullet) \xrightarrow{\delta_{*p}} H_{p-1}(A_\bullet) \xrightarrow{\bar{\phi}_{p-1}} H_{p-1}(B_\bullet) \rightarrow \cdots$$

es exacta.

En el siguiente diagrama conmutativo se ve claramente qué está pasando:

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & 0 & & 0 & & 0 \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 \cdots & \longrightarrow & A_{p+1} & \xrightarrow{\partial_{p+1}} & A_p & \xrightarrow{\partial_p} & A_{p-1} \longrightarrow \cdots \\
 & & \downarrow i_{p+1} & & \downarrow i_p & & \downarrow i_{p-1} \\
 \cdots & \longrightarrow & B_{p+1} & \xrightarrow{\partial_{p+1}} & B_p & \xrightarrow{\partial_p} & B_{p-1} \longrightarrow \cdots \\
 & & \downarrow j_{p+1} & & \downarrow j_p & & \downarrow j_{p-1} \\
 \cdots & \longrightarrow & C_{p+1} & \xrightarrow{\partial_{p+1}} & C_p & \xrightarrow{\partial_p} & C_{p-1} \longrightarrow \cdots \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 & & 0 & & 0 & & 0
 \end{array}$$

Demostración. Explicamos un poco cómo definir el homomorfismo de conexión haciendo cacería de diagrama. Comenzamos con un ciclo $c \in C_p(A)$. Como j_p es suprayectiva, existe un $a \in B_p$ tal que $j_p(a) = c$. Luego, $\partial_p(a) \in \ker j_{p-1}$, ya que, como el diagrama conmuta, $\partial_p j_p = j_{p-1} \partial_p$ y c es un ciclo. Como la sucesión es exacta, $\ker j_{p-1} = \text{img } i_{p-1}$, así que existe $a \in A_{p-1}$ tal que $i_{p-1}(a) = \partial_p(b)$. Este a es un ciclo, ya que el diagrama conmuta, $i_{p-2}(a) = \partial(\partial(b)) = 0$, y la i_{p-2} es inyectiva por exactitud, es decir, el único elemento al que va a dar el cero es el cero. Así que definimos $\delta_{*p}[c] = [a]$.

Y una vez definido este homomorfismo, el resto de la prueba sale sin trucos. \square

Teorema (Naturalidad del homomorfismo de conexión). Para dos sucesiones exactas cortas y morfismos f, g y h ,

$$\begin{array}{ccccccc}
 0 & \longrightarrow & A_\bullet & \xrightarrow{i} & B_\bullet & \xrightarrow{j} & C_\bullet \longrightarrow 0 \\
 & & \downarrow f & & \downarrow g & & \downarrow h \\
 0 & \longrightarrow & A'_\bullet & \longrightarrow & B'_\bullet & \longrightarrow & C'_\bullet \longrightarrow 0
 \end{array}$$

donde las filas son exactas.

Entonces, el siguiente diagrama conmuta

$$\begin{array}{ccccccccccc}
 \cdots & \longrightarrow & H_p(A) & \longrightarrow & H_p(B) & \longrightarrow & H_p(C) & \xrightarrow{\delta_*} & H_{p-1}(A) & \longrightarrow & H_{p-1}(B) & \longrightarrow & H_{p-1}(C) & \longrightarrow \cdots \\
 & & \downarrow \bar{f} & & \downarrow \bar{g} & & \downarrow \bar{h} & & \downarrow \bar{f} & & \downarrow \bar{g} & & \downarrow \bar{h} & \\
 \cdots & \longrightarrow & H_p(A') & \longrightarrow & H_p(B') & \longrightarrow & H_p(C') & \longrightarrow & H_{p-1}(A') & \longrightarrow & H_{p-1}(B') & \longrightarrow & H_{p-1}(C') & \longrightarrow \cdots
 \end{array}$$

Demostración. Salvo en los cuadrados donde está \bar{h} a la izquierda y \bar{f} a la derecha, la conmutatividad se sigue por funtorialidad. \square

Lema (de los cinco). Consideremos el diagrama conmutativo con filas exactas

$$\begin{array}{ccccccccc}
 M_5 & \xrightarrow{f_5} & M_4 & \xrightarrow{f_4} & M_3 & \xrightarrow{f_3} & M_2 & \xrightarrow{f_2} & M_1 \\
 \downarrow h_5 & & \downarrow h_4 & & \downarrow h_3 & & \downarrow h_2 & & \downarrow h_1 \\
 N_5 & \xrightarrow{g_5} & N_4 & \xrightarrow{g_4} & N_3 & \xrightarrow{g_3} & N_2 & \xrightarrow{g_2} & N_1
 \end{array}$$

Si h_5, h_4, h_2 y h_1 son isomorfismos, entonces h_3 también.

1.2 Más álgebra homológica

Tomemos N, M R -módulos, y el conjunto de homomorfismos R -lineales de M en N , que es un grupo abeliano (cuya identidad es el morfismo que manda todo a 0, y $f + g(m) = f(m) + g(m)$ que también es un morfismo, $(-f)(m) = -f(m)$). También tiene estructura de R -módulo con la operación $(rf)(m) = rf(m) = f(rm)$.

Ahora construyamos un funtor:

$$\begin{aligned}
 \text{Hom}(-, N) : R\text{-mod} &\rightarrow \text{Ab} \\
 M &\mapsto \text{Hom}(M, N) \\
 M \xrightarrow{\varphi} M' &\mapsto ?
 \end{aligned}$$

La flecha inducida será

$$\begin{aligned}
 \text{Hom}(M, N) &\xleftarrow{\varphi^*} \text{Hom}(M', N) \\
 \varphi^*(f) &= f\varphi \leftarrow f
 \end{aligned}$$

De acuerdo a

$$\begin{array}{ccc}
 M & & \\
 \downarrow \varphi & \searrow f\varphi & \\
 M' & \xrightarrow{f} & N
 \end{array}$$

Así que $\text{Hom}(-, N)$ es un funtor **contravariante**. De hecho, es un **funtor aditivo exacto izquierdo**:

- **Aditivo**. Manda sumas directas en sumas directas, es decir,

$$\text{Hom}(M_1 \oplus M_2, N) \approx \text{Hom}(M_1, N) \oplus \text{Hom}(M_2, N)$$

Que tiene que ver con la propiedad universal de la suma directa:

$$\begin{array}{ccccc}
 M_1 & \hookrightarrow & M_1 \oplus M_2 & \hookleftarrow & M_2 \\
 & \searrow f & \downarrow \exists! f \oplus g & \swarrow g & \\
 & & N & &
 \end{array}$$

Donde $(f \oplus g)(m_1, m_2) = f(m_1) + g(m_2)$. Así que si tenemos (f, g) en el módulo de la derecha, lo mandamos a $f \oplus g$.

- **Exacto** Supongamos que tenemos la sucesión exacta corta

$$0 \longrightarrow A \xrightarrow{\varphi} B \xrightarrow{\psi} C \longrightarrow 0$$

a la que le aplicamos el funtor para obtener la sucesión exacta

$$0 \longrightarrow \text{Hom}(C, N) \xrightarrow{\psi^*} \text{Hom}(B, N) \xrightarrow{\varphi^*} \text{Hom}(A, N)$$

En general, φ^* no es suprayectiva.

Ejercicio.

- Checar lo anterior.

Solución. Basta ver que la flecha $0 \rightarrow A$ no necesariamente va a dar a una flecha de la forma $\text{Hom}(A, N) \rightarrow 0$. \square

- ¿Qué pasa con el cokernel?

Observación. También podemos definir el funtor análogo dejando libre la entrada de la derecha, y obtenemos un funtor covariante (que no usaremos tanto y también es aditivo exacto izquierdo).

Observación. Denotaremos $\text{Hom}_R(M, N) := M^*$, y, por si acaso $\text{Hom}(N, M) := M_*$.

1.3 Funtores derivados

Es un juego, y usaremos R -módulos libres, que tienen la ventaja de tener una base. Un **R -módulo libre** es uno de la forma $\bigoplus_{i \in I} R_i$ donde $R_i = R$. Los elementos canónicos son $e_j := (\delta_{ij})_{i \in I}$, y $\beta := \{e_j\}_{j \in J}$ es una **base** en cuanto a que cumple la siguiente propiedad universal: para cualquier R -módulo M y para toda función $f : \beta \rightarrow M$ existe un único $\bar{f} : L = \bigoplus_{i \in I} R_i \rightarrow M$ tal que el siguiente diagrama conmuta:

$$\begin{array}{ccc} \beta & \xrightarrow{f} & M \\ \downarrow & \nearrow \bar{f} & \\ L & & \end{array}$$

Luego, diremos que P es **proyectivo** si existe Q tal que $P \oplus Q$ es libre.

Ejemplo. $\mathbb{Z}/6 \approx \mathbb{Z}/2 \oplus \mathbb{Z}/3$

Proposición. Todo R -módulo es cociente de un R -módulo libre.

Demostración.

$$\begin{array}{ccc} L = \bigoplus_{i \in M} R_i & \xrightarrow{\bar{f}} & M \\ \uparrow & \nearrow & \\ M & & \end{array}$$

Como \bar{f} es suprayectiva, por primer teorema de isomorfismo, terminamos. \square

Definición. Sea M un R -módulo. Una **resolución libre (proyectiva)** de M es una sucesión exacta de la forma

$$\cdots \longrightarrow F_1 \xrightarrow{f_1} F_0 \xrightarrow{f_0} M \longrightarrow 0$$

tal que F_j es libre para toda j .

Teorema. Todo R -módulo tiene una resolución libre (proyectiva).

Demostración. f_0 sale por la proposición anterior. Tomamos el módulo $\ker f_0$, lo incluimos en F_0 escogemos F_1 que cubre $\ker f_0$ por la proposición anterior.

$$\begin{array}{ccccccc} \cdots & \longrightarrow & F_1 & \xrightarrow{f_1} & F_0 & \xrightarrow{f_0} & M \longrightarrow 0 \\ & & & \searrow f_1 & \uparrow & & \\ & & & & \ker f_0 & & \end{array}$$

□

Teorema. Sea $\alpha : M \rightarrow M'$ un homomorfismo.

$$\begin{array}{ccccccccccc} \cdots & \longrightarrow & F_2 & \xrightarrow{f_2} & F_1 & \xrightarrow{f_1} & F_0 & \xrightarrow{f_0} & M & \longrightarrow & 0 \\ & & \downarrow \alpha_2 & & \downarrow \alpha_1 & & \downarrow \alpha_0 & & \downarrow \alpha & & \\ \cdots & \longrightarrow & F'_2 & \xrightarrow{f'_2} & F'_1 & \xrightarrow{f'_1} & F'_0 & \xrightarrow{f'_0} & M & \longrightarrow & 0 \end{array}$$

entonces existen los α_i que hacen conmutar el diagrama.

Más aún, existen $\beta_i : F_i \rightarrow F'_i$ que cumplen lo mismo entonces los homomorfismos determinados por los α_i y β_i son homotópicos.

Demostración.

$$\begin{array}{ccccccccccc} & & & & & & \beta_0 & & & & \\ & & & & & & \downarrow & & & & \\ \cdots & \longrightarrow & F_2 & \xrightarrow{f_2} & F_1 & \xrightarrow{f_1} & F_0 & \xrightarrow{f_0} & M & \longrightarrow & 0 \\ & & \downarrow \alpha_2 & & \downarrow \alpha_1 & & \downarrow \alpha_0 & & \downarrow \alpha & & \\ \cdots & \longrightarrow & F'_2 & \xrightarrow{f'_2} & F'_1 & \xrightarrow{f'_1} & F'_0 & \xrightarrow{f'_0} & M & \longrightarrow & 0 \end{array}$$

Tomamos un elemento $e \in \beta_0$ en la base de F_0 . Lo mandamos mediante f_0 a M , luego con α . Pero como f'_0 es supra, podemos escoger un elemento $e' \in F'_0$ que le pega.

Ahora

$$\begin{array}{ccccccccc}
 & & & & \text{img } f_1 & & & & \\
 & & & & \downarrow & & & & \\
 \cdots & \longrightarrow & F_2 & \xrightarrow{f_2} & F_1 & \xrightarrow{f_1} & F_0 & \xrightarrow{f_0} & M \longrightarrow 0 \\
 & & \downarrow \alpha_2 & & \downarrow \alpha_1 & & \downarrow \alpha_0 & & \downarrow \alpha \\
 \cdots & \longrightarrow & F'_2 & \xrightarrow{f'_2} & F'_1 & \xrightarrow{f'_1} & F'_0 & \xrightarrow{f'_0} & M \longrightarrow 0 \\
 & & & & \uparrow & & & & \\
 & & & & \text{img } f'_1 & & & &
 \end{array}$$

Hay una flecha desde $\text{img } f_1$ hasta $\text{img } f'_1$ que cierra el diagrama.

Faltó lo de homotopía (usando las diagonales como el diagrama coloreado). \square

Definición. Sea M un R -módulo. Tomamos una resolución libre

$$\cdots \longrightarrow F_1 \xrightarrow{f_1} F_0 \xrightarrow{f_0} M \longrightarrow 0$$

Quitamos M :

$$\cdots \longrightarrow F_1 \xrightarrow{f_1} F_0 \longrightarrow 0$$

Aplicamos $\text{Hom}_R(-, N)$:

$$0 \longrightarrow F_0^* \xrightarrow{f_1} F_1^* \longrightarrow F_2^* \xrightarrow{f_3^*} \cdots$$

Definimos

$$\text{Ext}_R^n(M, N) := H_n(0 \rightarrow F^*)$$

Teorema. $\text{Ext}_R^n(M, N)$ no depende de la resolución.

Demostración. Usamos el teorema anterior (dos veces), tomando dos resoluciones de M usando la identidad como α :

$$\begin{array}{ccccccccc}
 \cdots & \longrightarrow & F_2 & \xrightarrow{f_2} & F_1 & \xrightarrow{f_1} & F_0 & \xrightarrow{f_0} & M \longrightarrow 0 \\
 & & \downarrow \alpha_2 & & \downarrow \alpha_1 & & \downarrow \alpha_0 & & \downarrow Id \\
 \cdots & \longrightarrow & F'_2 & \xrightarrow{f_2} & F'_1 & \xrightarrow{f_1} & F'_0 & \xrightarrow{f_0} & M \longrightarrow 0 \\
 & & \downarrow \beta_2 & & \downarrow \beta_1 & & \downarrow \beta_0 & & \downarrow Id \\
 \cdots & \longrightarrow & F_2 & \xrightarrow{f_2} & F_1 & \xrightarrow{f_1} & F_0 & \xrightarrow{f_0} & M \longrightarrow 0
 \end{array}$$

Y aquí resulta que $\{\beta_i \alpha_i\} \simeq \{Id\}$. Y dualizamos:

$$\begin{array}{ccccccc}
 \cdots & \longleftarrow & F_1^* & \longleftarrow & F_0^* & \longleftarrow & M^* \longleftarrow 0 \\
 & & \uparrow \alpha_1^* & & \uparrow \alpha_1^* & & \\
 \cdots & \longleftarrow & F_1'^* & \longleftarrow & F_0'^* & \longleftarrow & M^* \longleftarrow 0
 \end{array}$$

Y como el funtor es aditivo, la homotopía pasa al dual, es decir, $\{\beta_i \alpha_i^*\} \simeq \{Id\}$. Luego pasamos a los grupos de homología:

$$\begin{array}{c} H_1(F^*) \\ \alpha_1^\# \uparrow \\ H_1(F'^*) \\ \beta_1^\# \uparrow \\ H_1(F^*) \end{array}$$

Cambiando los roles, obtenemos que estas dos funciones $\alpha_1^\#$ y $\beta_1^\#$ son inversas una de la otra. \square

Proposición. $\text{Ext}_R^0(M, N) \approx \text{Hom}_R(M, N)$.

Demostración. Tenemos:

$$0 \longrightarrow \text{img } f_1 \xrightarrow{f_1} F_0 \xrightarrow{f_0} M \longrightarrow 0$$

$$0 \longrightarrow M^* \xrightarrow{f_0^*} F_0^* \xrightarrow{f_1^*} \text{img } f_1^*$$

Luego $\ker f_1^* \approx \text{img } f_0^* \approx M^*$. Luego, por definición $\text{Ext}_R^0(M, N) = \ker f_1^* \approx M^* = \text{Hom}(M, N)$ \square

Lema (De la herradura). *Sucesiones exactas cortas de módulos inducen sucesiones exactas cortas de resoluciones.* Tomemos una sucesión exacta corta y dos resoluciones libres de los extremos. Entonces existen

$$\begin{array}{ccccccc} & & 0 & & 0 & & 0 \\ & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\ 1 & \longrightarrow & M' & \longrightarrow & M & \longrightarrow & M'' \longrightarrow 0 \\ & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\ 0 & \longrightarrow & F'_0 & \longrightarrow & F_0 & \longrightarrow & F''_0 \longrightarrow 0 \\ & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\ 0 & \longrightarrow & F'_1 & \longrightarrow & F_1 & \longrightarrow & F''_1 \longrightarrow 0 \\ & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\ & & \dots & & \dots & & \dots \end{array}$$

Demostración. Pa pronto, la resolución de en medio es la suma de las resoluciones:

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & 0 & & 0 & & \\
 & & \uparrow & & \uparrow & & \\
 1 & \longrightarrow & M' & \longrightarrow & M & \longrightarrow & M'' \longrightarrow 0 \\
 & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\
 0 & \longrightarrow & F'_0 & \longrightarrow & F'_0 \oplus F''_0 & \longrightarrow & F''_0 \longrightarrow 0
 \end{array}$$

Y hay que hacer todo lo de rutina.

□

El lunes: dualizar esto.