

eLENA VII



VII Encuentro Nacional de Álgebra

Curso de Nivel Intermedio

Teoría combinatoria de nudos

Leandro Vendramin

Universidad de Buenos Aires, Argentina

VII Encuentro Nacional de Álgebra

La Falda, Sierras de Córdoba, Argentina

4 al 8 de Agosto de 2014

www.famaf.unc.edu.ar/~ciem/elena7

TEORÍA COMBINATORIA DE NUDOS

LEANDRO VENDRAMIN

RESUMEN. Estas notas corresponden a un minicurso dictado en el Encuentro Nacional de Álgebra, elENA VII, La Falda, Córdoba, 2014.

ÍNDICE

Introducción	31
1. Nudos	32
2. Composición de nudos y nudos primos	36
3. Coloreos	37
4. El grupo fundamental de un nudo	41
5. Quandles	43
6. Ejemplos de quandle fundamentales	47
7. Coloreos generalizados	49
8. Invariantes por 2-cociclos	52
Referencias	54
Índice alfabético	55

INTRODUCCIÓN

Robert Graves¹ cuenta una leyenda griega en la que un oráculo anunció a los habitantes de Frigia que reconocerían a su futuro rey al verlo llegar en una carreta de bueyes. Tiempo después, el pueblo reconoció en un campesino de nombre Gordias a su nuevo rey. En agradecimiento, Gordias ofreció a Zeus su carro y el yugo, que había atado con un nudo tan complicado que nadie podría desatar. Se dijo que el que fuera capaz de desatar el nudo de Gordias conquistaría Asia. Siglos después, Alejandro Magno tuvo que enfrentarse al reto de desatar ese nudo y, sin vacilación, deshizo el nudo al cortar la cuerda con su espada. Según se dice, esa misma noche, Zeus, con una fuerte tormenta, mostró su aprobación a la solución encontrada por Alejandro Magno.

La teoría de nudos, en principio, intenta entender los nudos que podríamos encontrarnos en la vida real.



El objetivo final de la teoría es obtener una clasificación completa de nudos a menos de deformaciones continuas. A simple vista, uno podría pensar entonces que la teoría de nudos es una divertida rama de la topología. Si bien esto es cierto, es necesario destacar que el estudio de los nudos se lleva a cabo gracias al uso de

¹R. Graves, Los mitos griegos, Alianza Editorial, 1996.

técnicas muy profundas que provienen de distintas ramas de la matemática como la geometría, el álgebra y el análisis. La teoría de nudos tiene además muchas aplicaciones en otras ciencias como la biología, la física y la criptografía.

Invitamos al lector a que tome un pedazo de cuerda y haga un nudo tal como el que vemos a la izquierda en la figura 1. Si pegamos los extremos de esa cuerda obtendremos una cuerda anudada que no tiene extremos tal como la que vemos a la derecha en la figura 1.



FIGURA 1. Nudos.

¿Puede desatarse ese nudo? Después de varios minutos de experimentación se hace más o menos evidente que ese nudo podrá deshacerse solamente si nos permitimos cortar la cuerda. Sin embargo, si aceptamos soluciones como la que encontró Alejandro Magno, entonces todo nudo puede desatarse y el problema de clasificar nudos –que resulta ser muy poco interesante– queda resuelto: todo nudo es trivial.

¿Qué pasa si no está permitido cortar cuerdas? ¿Cómo podríamos demostrar matemáticamente que un nudo no puede desatarse? Para responder esta pregunta, primero es necesario describir matemáticamente un nudo de forma tal que la definición permita modelar con cierta fidelidad el fenómeno real de anudar una cuerda. Necesitamos además que nuestra definición excluya patologías matemáticas desagradables tales como hacer desaparecer un nudo al tirar indefinidamente de los extremos de la cuerda. Por último, necesitamos una definición precisa y acertada de lo que significa que dos nudos sean *equivalentes*, es decir iguales aunque se vean distintos. Una vez que tengamos estas cosas, habremos formulado matemáticamente el problema de estudiar nudos, y entonces, tal como se hace en muchas ramas de la matemática, podremos concentrarnos en estudiar nudos mediante el uso de invariantes.

Agradecimientos. Le agradezco a Edwin Clark, por haber leído estas notas y por los muchos comentarios que me ayudaron a mejorar este curso. Agradezco también a Jonathan Barmak, Marco Farinati, César Galindo, Juliana García Galofre, y Masahico Saito.

1. NUDOS

Esta primera sección está dedicada a los conceptos básicos de la teoría de nudos y al teorema de Reidemeister, que nos permite traducir el problema topológico de distinguir nudos al lenguaje de la combinatoria.



FIGURA 2. Kurt Reidemeister (1893–1971)

1.1. Un nudo (en \mathbb{R}^3) es una función inyectiva y continua $S^1 \rightarrow \mathbb{R}^3$, donde

$$S^1 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x^2 + y^2 = 1\}.$$

En el conjunto de nudos definimos la relación de equivalencia dada por **isotopía**. Diremos que los nudos dados por las funciones α y β son **equivalentes** si y sólo si existe una función continua $H: S^1 \times [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^3$ tal que la función $H_t: z \mapsto H(z, t)$ es un nudo para todo $t \in [0, 1]$, $H_0 = \alpha$ y $H_1 = \beta$.

1.2. Los nudos pueden ser dotados de una orientación. A lo largo de este trabajo siempre trabajaremos con nudos orientados.

1.3. Para evitar patologías desagradables, en este curso consideraremos únicamente nudos equivalentes a nudos dados por poligonales. Estos nudos se llaman **nudos mansos**. En la figura 3 mostramos un ejemplo de nudo salvaje (no manso). Para nosotros, un **nudo** siempre será un nudo manso.

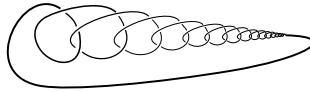


FIGURA 3. Un ejemplo de nudo salvaje.

1.4. En la práctica, nuestros nudos poligonales tendrán tantos segmentos que será casi imposible diferenciar a nuestra curva de una curva suave. En relación con esta observación, mencionamos el siguiente teorema:

Teorema. *Un nudo parametrizado por longitud de arco y de clase C^1 es manso.*

Demostración. La prueba de este resultado es muy técnica pero sólo utiliza conceptos básicos de cálculo avanzado. Para una demostración completa referimos a [6, Apéndice I]. \square

1.5. Sea K un nudo. Consideremos la proyección de K en el plano dada por $\pi: (x, y, z) \mapsto (x, y, 0)$. Un punto $p \in \pi(K)$ es un **punto múltiple** si $\pi^{-1}(p)$ contiene más de un punto de K . La **multiplicidad** de p se define como el cardinal del conjunto $\pi^{-1}(p) \cap K$. Una proyección de K en el plano se dice **genérica** tiene las siguientes propiedades: 1) hay finitos puntos de multiplicidad mayor a uno, 2) no hay puntos de multiplicidad mayor a dos, y 3) no hay puntos dobles donde uno de los puntos es un vértice. La figura 4 muestra algunos ejemplos de cruces no admitidos en una proyección genérica.

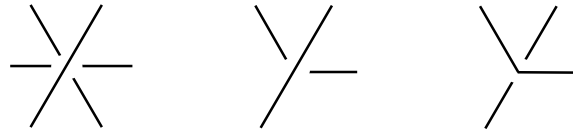


FIGURA 4. Cruces no admitidos en el diagrama de un nudo dado por una poligonal.

Un **diagrama** de K es una proyección genérica de K en el plano donde en cada **cruce** (punto de multiplicidad dos) se puede distinguir qué segmento pasa por arriba y qué segmento pasa por debajo. Para ilustrar esta situación, el segmento que pasa por debajo se dibuja cortado. Las componentes conexas del diagrama se llaman entonces **arcos**. Para diagramas de nudos orientados, agregaremos una flecha al diagrama que indique la orientación.

1.6. En virtud de simplificar la notación, seremos un poco imprecisos a la hora de hablar de nudos. Para nosotros, un nudo será una función inyectiva y continua $S^1 \rightarrow \mathbb{R}^3$ o una clase de equivalencia de tales funciones. Por más extraño que parezca, esto no causará confusión alguna.

1.7. Cualquier nudo equivalente a S^1 será considerado como el **nudo trivial**. En la práctica, no siempre es fácil reconocer la trivialidad de un nudo. En la figura 5 vemos tres proyecciones distintas del nudo trivial. Una proyección aún más curiosa del nudo trivial puede verse en la figura 6.

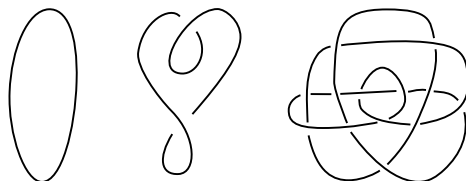


FIGURA 5. Tres proyecciones del nudo trivial.

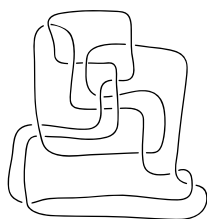


FIGURA 6. Una extraña proyección del nudo trivial descubierta por Morwen Thistlethwaite.

1.8. En 1926 Reidemeister vislumbró una forma combinatoria de chequear si dos nudos son equivalentes. Básicamente, dos diagramas representarán al mismo nudo si y sólo si puede pasarse de un diagrama al otro mediante una sucesión finita de ciertas transformaciones, \mathcal{R}_1 , \mathcal{R}_2 y \mathcal{R}_3 , llamadas **movimientos de Reidemeister**. Hay tres de estos movimientos: el primero se muestra en la figura 7, el segundo en la figura 8 y el tercero en la figura 9.

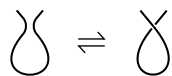


FIGURA 7. \mathcal{R}_1

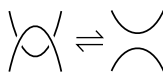


FIGURA 8. \mathcal{R}_2

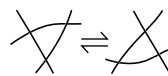


FIGURA 9. \mathcal{R}_3

Teorema (Reidemeister). *Dos nudos son equivalentes si y sólo si sus diagramas están conectados por una sucesión finita de movimientos de Reidemeister.*

Demostración. Para la demostración referimos por ejemplo a [3, 1.14]. □

1.9. El teorema de Reidemeister también puede utilizarse para nudos orientados si se consideran todas las orientaciones posibles para los diagramas de las figuras 7–9.

1.10. El teorema de Reidemeister es el núcleo de la teoría combinatoria de nudos, ya que nos permite, por ejemplo, pensar que un nudo es una clase de equivalencia de diagramas, donde dos diagramas son equivalentes si y sólo si están conectados por una sucesión finita de movimientos de Reidemeister.

1.11. El **nudo trébol** es quizá el nudo más famoso. Una representación paramétrica de la curva que da este nudo es

$$\begin{aligned}x &= \sin(t) + 2 \sin(2t) \\y &= \cos(t) - 2 \cos(2t) \\z &= -\sin(3t)\end{aligned}$$

El nudo trébol, tal como lo vemos en la figura 10, se denota por el símbolo 3_1 . Queda como ejercicio demostrar que los nudos de la figura 10 son equivalentes.

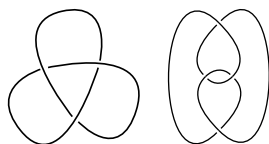


FIGURA 10. Dos proyecciones del nudo 3_1 .

1.12. Otro nudo famoso es el nudo 4_1 o **nudo ocho**. Una representación paramétrica para la curva que da este nudo es

$$\begin{aligned}x &= (2 + \cos(2t)) \cos(3t) \\y &= (2 + \cos(2t)) \sin(3t) \\z &= \sin(4t)\end{aligned}$$

y una proyección puede verse en la figura 11.



FIGURA 11. El nudo 4_1 .

1.13. La **imagen especular** de un nudo se obtiene al aplicarle al nudo la transformación $(x, y, z) \mapsto (x, y, -z)$. En la figura 12 vemos el nudo 3_1 y su imagen especular $m(3_1)$. En 8.7 demostraremos que los nudos 3_1 y $m(3_1)$ no son equivalentes.

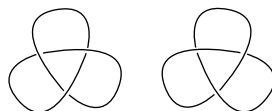


FIGURA 12. El nudo 3_1 (derecha) y su imagen especular $m(3_1)$ (izquierda).

1.14. Si K es un nudo, el **reverso** $r(K)$ de K es K como conjunto pero con la orientación opuesta. Los operadores r y m son involuciones en el espacio de nudos y generan un grupo isomorfo a $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$.

1.15. El nudo 3_1 es equivalente al nudo $r(3_1)$. El nudo 4_1 es **totalmente simétrico**, es decir: los nudos 4_1 , $m(4_1)$, $r(4_1)$ y $rm(4_1)$ son todos equivalentes. El 9_{32} de la figura 13 es **totalmente asimétrico**, es decir: los nudos 9_{32} , $m(9_{32})$, $r(9_{32})$ y $rm(9_{32})$ son todos no equivalentes.

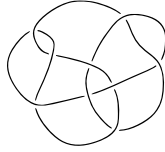
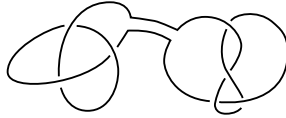


FIGURA 13. El nudo 9_{32} es totalmente asimétrico.

2. COMPOSICIÓN DE NUDOS Y NUDOS PRIMOS

En esta sección definiremos una cierta forma de componer nudos de forma tal que el nudo trivial sea el neutro con respecto a esta operación.

2.1. Dados dos nudos K y L orientados podemos obtener un nuevo nudo con el siguiente procedimiento: Quitamos un pedacito de arco de cada una de las proyecciones de nuestros nudos y luego unimos los cuatro puntos finales obtenidos con dos nuevos arcos (¡es importante que hagamos esto sin agregar nuevos cruces!) tal como muestra la figura siguiente:



Esta operación se denomina **composición** de nudos. La composición de los nudos K y L se denota por $K\#L$. No es difícil demostrar que la composición de nudos es una operación asociativa y conmutativa y que el nudo trivial es el neutro de esta operación.

2.2. *Observación.* La composición de nudos solamente tiene sentido si se hace sobre nudos orientados.

2.3. Un nudo no trivial es **primo** si no puede descomponerse como la composición de otros nudos no triviales. Un nudo es **compuesto** si no es primo.

2.4. El problema de determinar si un nudo dado es primo es extremadamente difícil. La figura 14 contiene las proyecciones de los primeros nudos primos (salvo reverso e imagen especular) donde cada nudo tiene a lo sumo siete cruces.

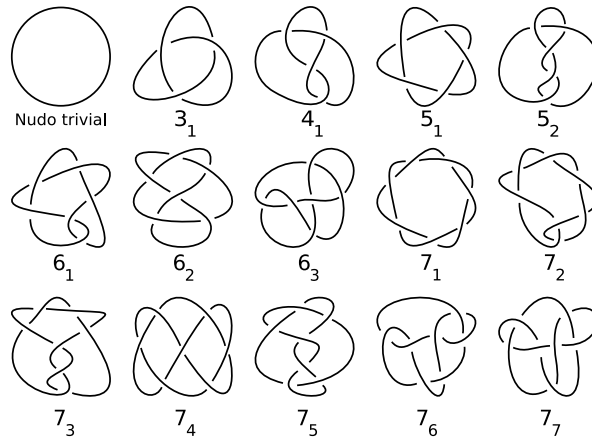


FIGURA 14. Algunos nudos primos.

2.5. **Ejemplo.** Consideremos el nudo que se forma al componer dos nudos 3_1 . Este nudo se conoce como el **nudo de la abuela** (o *granny knot*, en inglés), se denota por $3_1\#3_1$, y se muestra a la izquierda en la figura 15.

El nudo compuesto formado por 3_1 y su imagen especular $m(3_1)$ se conoce como el **nudo cuadrado** (o *square knot*, en inglés), se denota por $3_1\#m(3_1)$, y se muestra a la derecha en la figura 15.

En 7.24 y 8.8 demostraremos que el nudo de la abuela y el nudo cuadrado no son equivalentes.

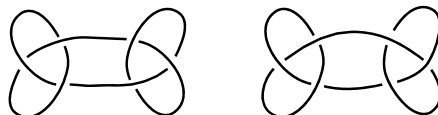


FIGURA 15. El nudo de la abuela (izquierda) y el nudo cuadrado (derecha) no son equivalentes.

2.6. Un teorema de H. Schubert establece que todo nudo puede expresarse en forma única como la composición de nudos primos [3, Cap. VII].

2.7. El género de un nudo y las superficies de Seifert permiten demostrar que el nudo trivial no puede escribirse como la composición de dos nudos no triviales, ver por ejemplo [1, §4.3]. ¡Este resultado nos dice que no es posible hacer dos nudos consecutivos en un pedacito de cuerda de forma tal que estos nudos se cancelen mutuamente!

2.8. Como la demostración del resultado mencionado en 2.7 es bastante difícil, nos gustaría tener a mano una prueba más sencilla. Es por eso que formulamos el siguiente problema:

Problema. ¿Existe algún invariante sencillo que permita demostrar que el nudo trivial no puede escribirse como la composición de dos nudos no triviales?

2.9. Puede construirse un invariante de nudos a partir de la cantidad de cruces que tienen los diagramas de un nudo. Para ser más precisos, definiremos el **número de cruces** $c(K)$ de un nudo K como el menor número de cruces que aparece en cualquier diagrama del nudo K . La siguiente conjetura lleva abierta más de cien años y nos recuerda lo poco que sabemos del número $c(K)$.

Conjetura. $c(K\#L) = c(K) + c(L)$.

3. COLOREOS

En esta sección definiremos algunos invariantes elementales y probaremos la no trivialidad de algunos nudos.

3.1. Supongamos que queremos mostrar que un cierto nudo no es trivial. ¿Qué invariante sencillo podríamos obtener a partir de los tres movimientos de Reidemeister? Responderemos esta pregunta al introducir el **coloreo con tres colores**. Fijemos un conjunto de tres colores, digamos {rojo, verde, azul}. Una proyección de un nudo es **coloreable con tres colores** si cada arco de la proyección puede colorearse con uno de los tres colores de tal forma que en cada cruce se ven los tres colores elegidos o únicamente uno de los tres.

3.2. La cantidad de coloreos con tres colores da un invariante de nudos. Este resultado es un caso particular del teorema 3.8 que veremos más adelante.



FIGURA 16. Ralph Fox (1913–1973)

3.3. Ejemplo. La figura 17 nos muestra dos caras del mismo fenómeno: el nudo 3_1 tiene coloreos no triviales con tres colores y el nudo 4_1 no. Vemos entonces que el coloreo con tres colores nos permite distinguir el nudo 3_1 del nudo trivial y del nudo 4_1 . Sin embargo, no nos permite determinar si el nudo 4_1 es trivial.

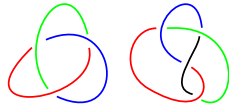


FIGURA 17. El nudo 3_1 coloreado con tres colores. El nudo 4_1 puede colorearse con tres colores solamente de forma trivial.

3.4. Vamos a profundizar un poco en la idea de colorear con tres colores. Supongamos que nuestros colores son los elementos de $\mathbb{Z}_3 = \{0, 1, 2\}$ y que K es un nudo con n cruces. Si etiquetamos los arcos del nudo K con los elementos de \mathbb{Z}_3 vemos que la condición 3.1 que define coloreos por tres colores puede traducirse en términos de la compatibilidad de un sistema de ecuaciones lineales que tiene una ecuación por cada cruce del diagrama. Para ser más precisos, la ecuación que corresponde al cruce de la figura 18 es $a + b + c = 0$, donde $a, b, c \in \mathbb{Z}_3$. Observemos que esta ecuación puede reescribirse como

$$(3.5) \quad 2a - b - c = 0.$$

Cada coloreo del nudo K será una solución del sistema de ecuaciones formado por las ecuaciones (3.5). En particular, un coloreo no trivial será una solución que involucre todos los elementos de \mathbb{Z}_3 .

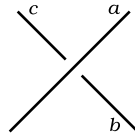


FIGURA 18. En este cruce la ecuación de coloreo es $2a - b - c = 0$.

3.6. Ejemplo. Si etiquetamos con $a, b, c \in \mathbb{Z}_3$ los arcos del diagrama del nudo 3_1 que vemos a la izquierda en la figura 17, el sistema de ecuaciones que resuelve el problema del coloreo con tres colores es el siguiente:

$$2a - b - c = 0, \quad -a - b + 2c = 0, \quad -a + 2b - c = 0,$$

La cantidad de coloreos con tres colores del nudo 3_1 es entonces la cantidad de vectores que tiene el núcleo de la **matriz de coloreos** del nudo:

$$C(3_1) = \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \\ -1 & 2 & -1 \end{pmatrix} \in \mathbb{Z}_3^{3 \times 3}.$$

Como esta matriz tiene rango uno, el núcleo es un espacio vectorial (sobre \mathbb{Z}_3) de dimensión dos. Esto implica que el núcleo tiene nueve elementos, y por lo tanto el nudo 3_1 tiene nueve coloreos con tres colores (de los cuales seis son no triviales).

3.7. En 1956 Fox definió una generalización del coloreo con tres colores. Sea $p > 2$ un número primo. Diremos que un nudo admite un **coloreo de Fox con p colores** si cada arco puede etiquetarse con un número de $\mathbb{Z}_p = \{0, \dots, p-1\}$ de forma tal que en cada cruce como el que vemos en la figura 18 se cumple la ecuación

$$2a - b - c = 0,$$

donde $a, b, c \in \mathbb{Z}_p$. Tal como se hizo en el ejemplo 3.6, estudiar coloreos de Fox con p colores es equivalente a estudiar el núcleo de la matriz de coloreos vista como matriz con coeficientes en \mathbb{Z}_p .

3.8. **Teorema.** *Sea p un número primo. La cantidad de coloreos de Fox con p colores es un invariante de nudos.*

Demostración. Fijemos un diagrama y un coloreo de Fox del diagrama. Como vemos en la figura 19, el coloreo no se altera al aplicar el primer movimiento de Reidemeister ya que $b = 2a - a = a$.

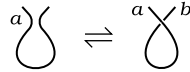


FIGURA 19. El coloreo de Fox es invariante bajo el primer movimiento de Reidemeister pues $b = 2a - a = a$.

La figura 20 nos muestra que el coloreo tampoco se altera al aplicar el segundo movimiento de Reidemeister pues $c = 2a - (2a - b) = b$.

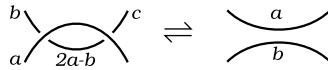


FIGURA 20. El coloreo de Fox es invariante bajo el segundo movimiento de Reidemeister pues $c = 2a - (2a - b) = b$.

Finalmente, la figura 21 prueba que el coloreo de Fox es invariante bajo el tercer movimiento de Reidemeister pues, como $d = 2a - (2b - c)$ y $d' = 2(2a - b) - (2b - c)$, se tiene que $d = d'$.

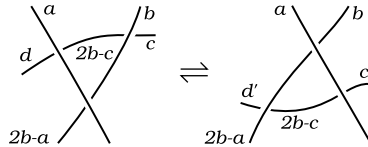


FIGURA 21. El coloreo de Fox es invariante bajo el tercer movimiento de Reidemeister pues $d = d'$.

Hemos probado entonces que existe una biyección entre los coloreos antes y después de aplicar los movimientos de Reidemeister. Luego, la cantidad de coloreos de Fox es un invariante de nudos. \square

3.9. Ejemplo. Estudiemos algunos coloreos del nudo 4_1 . Fijemos un número primo $p > 2$. Si suponemos que los arcos del nudo 4_1 están etiquetados con $a, b, c, d \in \mathbb{Z}_p$ tal como vemos en la figura 22, el sistema de ecuaciones que resuelve el problema del coloreo de Fox con p colores es

$$(3.10) \quad -a + 2b - d = 0, \quad -a - b + 2c = 0, \quad 2a - c - d = 0, \quad -b - c + 2d = 0.$$

Como vimos en el ejemplo 3.3, la matriz asociada al sistema (3.10) es lo que denominamos la matriz de coloreo del nudo 4_1 :

$$C(4_1) = \begin{pmatrix} -1 & 2 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \in \mathbb{Z}_p^{4 \times 4}.$$

Un cálculo elemental nos muestra que

$$\dim \ker C(4_1) = \begin{cases} 1 & \text{si } p = 3, \\ 2 & \text{si } p = 5. \end{cases}$$

Esto nos dice dos cosas: primero, que 4_1 no puede colorearse de forma no trivial con tres colores; y segundo, que 4_1 admite al menos un coloreo de Fox no trivial con cinco colores. Luego, el nudo 4_1 no es equivalente al nudo trivial.

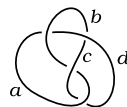


FIGURA 22. El nudo 4_1 .

3.11. Ejercicio. Sean $p > 2$ un número primo y K un nudo con n cruces. Pruebe que la cantidad de coloreos de Fox con p colores que tiene K es p^m para algún $m \leq n$.

3.12. Ejercicio. El cuadro 1 muestra cuáles de los nudos de la figura 14 admiten coloreos de Fox no triviales para $p \in \{3, 4, 7, 11, 13, 17\}$. ¿Qué conclusiones puede obtener?

CUADRO 1. Algunos coloreos de Fox para los nudos de la figura 14.

	3	5	7	11	13	17
3_1	✓					
4_1		✓				
5_1		✓				
5_2			✓			
6_1	✓					
6_2				✓		
6_3					✓	
7_1			✓			
7_2				✓		
7_3					✓	
7_4	✓	✓				
7_5						✓

4. EL GRUPO FUNDAMENTAL DE UN NUDO

En esta sección definiremos el grupo fundamental de un nudo y mostraremos que esta construcción da un buen invariante. Para una exposición detallada sobre las nociones básicas respecto del grupo fundamental de un nudo referimos a [6].

4.1. Se define el **grupo fundamental** $\pi_1(K)$ del nudo K como $\pi_1(\mathbb{R}^3 \setminus K)$.

4.2. Veamos cómo calcular el grupo fundamental de un nudo. Supongamos que K es un nudo con n cruces. Etiquetamos los arcos con las variables a_1, a_2, a_3, \dots . Como se ve en la figura 23, el diagrama tendrá dos tipos de cruce: cruces positivos y cruces negativos. Por cada cruce χ del diagrama como el que vemos en la figura 23, consideramos la **relación de Wirtinger** $r_\chi = 1$, donde

$$(4.3) \quad r_\chi = a_i a_j a_i^{-1} a_k^{-1}.$$

A principios del siglo XX Wirtinger demostró que el grupo fundamental del nudo K es isomorfo al grupo dado por los generadores a_1, a_2, a_3, \dots y las relaciones de Wirtinger. Esta presentación del grupo fundamental se conoce como la **presentación de Wirtinger**.

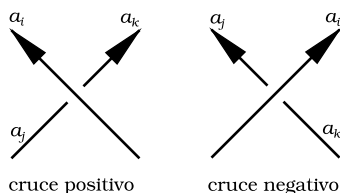


FIGURA 23. Una orientación en el nudo da dos tipos de cruce. En estos casos, la relación de Wirtinger es $a_i a_j a_i^{-1} = a_k$.

Teorema (Wirtinger). *Sea K un nudo y supongamos que K tiene una proyección con n arcos y m cruces. Entonces*

$$(4.4) \quad \pi_1(K) \simeq \langle a_1, a_2, \dots, a_n : r_1, r_2, \dots, r_m \rangle,$$

donde las relaciones r_1, \dots, r_m están dadas por las fórmulas (4.3). La ecuación (4.4) simboliza el cociente grupo libre en a_1, \dots, a_n por el menor subgrupo normal que contiene a los elementos r_1, \dots, r_m .



FIGURA 24. Wilhelm Wirtinger (1865–1945)

4.5. **Ejercicio.** Pruebe que el grupo fundamental del nudo trivial es isomorfo a \mathbb{Z} .



FIGURA 25. Max Dehn (1878–1952)

4.6. En 1915 Dehn demostró que el grupo fundamental permite detectar la trivialidad de un nudo. Más precisamente, el teorema de Dehn establece que un nudo es trivial si y sólo si el grupo fundamental del nudo es isomorfo a \mathbb{Z} . Es importante remarcar que, en general, es muy difícil determinar si un grupo finitamente presentado es isomorfo al grupo trivial.

4.7. **Ejemplo.** Vamos a calcular el grupo fundamental del nudo 3_1 que vemos en la figura 26. Las relaciones de Wirtinger son

$$(4.8) \quad a_1 a_2 a_1^{-1} = a_3, \quad a_2 a_3 a_2^{-1} = a_1, \quad a_3 a_1 a_3^{-1} = a_2,$$

y entonces,

$$\pi_1(3_1) \simeq \langle a_1, a_2, a_3 : a_1 a_2 a_1^{-1} = a_3, a_2 a_3 a_2^{-1} = a_1, a_3 a_1 a_3^{-1} = a_2 \rangle.$$

Vamos a utilizar el grupo $\pi_1(3_1)$ para dar otra demostración de la no trivialidad de 3_1 . Como existe un morfismo de grupos $\pi_1(3_1) \rightarrow \mathbb{S}_3$ tal que

$$a_1 \mapsto (12), \quad a_2 \mapsto (23), \quad a_3 \mapsto (13),$$

y el grupo simétrico \mathbb{S}_3 es un grupo no abeliano, se sigue que $\pi_1(3_1)$ es un grupo no abeliano. En particular $\pi_1(3_1) \not\simeq \mathbb{Z}$ y entonces el nudo 3_1 no es equivalente al nudo trivial.

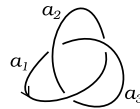


FIGURA 26. El grupo fundamental de 3_1 es isomorfo al grupo de trenzas \mathbb{B}_3 .

4.9. **Ejercicio.** Sea $n \in \mathbb{N}_{\geq 2}$. Recordemos que el **grupo de trenzas** \mathbb{B}_n se define como el grupo dado por los generadores $\sigma_1, \dots, \sigma_{n-1}$ y las relaciones

$$\begin{aligned} \sigma_i \sigma_{i+1} \sigma_i &= \sigma_{i+1} \sigma_i \sigma_{i+1} && \text{para todo } i \in \{1, \dots, n-2\}, \\ \sigma_i \sigma_j &= \sigma_j \sigma_i && \text{para todo par } i, j \text{ tal que } |i-j| > 1. \end{aligned}$$

Pruebe que $\pi_1(3_1) \simeq \mathbb{B}_3$.

4.10. Tietze fue el primero en calcular el grupo fundamental del nudo 3_1 en 1908. Ese mismo año conjeturó que dos nudos son equivalentes si y sólo si sus complementos en \mathbb{R}_3 son homeomorfos. Muchos años después, en 1986, Gordon y Luecke probaron esta afirmación [7]. Como consecuencia del teorema de Gordon y Luecke puede probarse que dos nudos primos son equivalentes si y sólo si sus grupos fundamentales son isomorfos.



FIGURA 27. Heinrich Tietze (1880–1964)

4.11. **Ejemplo.** Calculemos el grupo fundamental del nudo 4_1 de la figura 28.

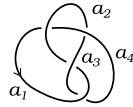


FIGURA 28. El grupo fundamental de 4_1 no es un grupo abeliano.

El diagrama tiene entonces dos cruces positivos y dos negativos. Las relaciones de Wirtinger son:

$$a_4 = a_1 a_3 a_1^{-1}, \quad a_2 = a_3 a_1 a_3^{-1}, \quad a_1 = a_2^{-1} a_4 a_2, \quad a_3 = a_4^{-1} a_2 a_4.$$

Si sustituimos $a_2 = a_3 a_1 a_3^{-1}$ en $a_4 = a_2 a_1 a_2^{-1}$, obtenemos $a_4 = a_3 a_1 a_3^{-1} a_1 a_3 a_1^{-1} a_3^{-1}$. Por lo tanto $a_4^{-1} a_3 a_4 = a_2$ es equivalente a $a_1 a_3 a_1^{-1} a_3 a_1 = a_3 a_1 a_3^{-1} a_1 a_3$. Como el resto de las relaciones de Wirtinger es consecuencia de $a_1 a_3 a_1^{-1} a_3 a_1 = a_3 a_1 a_3^{-1} a_1 a_3$,

$$\pi_1(4_1) \simeq \langle x, y \mid xyx^{-1}yx = yxy^{-1}xy \rangle.$$

Vamos a utilizar el grupo $\pi_1(4_1)$ para dar otra demostración de la no trivialidad del nudo 4_1 . Consideremos el morfismo $\pi_1(4_1) \rightarrow \mathbf{SL}(2, \mathbb{Z}_3)$ dado por

$$x \mapsto \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}, \quad y \mapsto \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}.$$

Como el grupo $\mathbf{SL}(2, \mathbb{Z}_3)$ no es abeliano, se sigue que $\pi_1(4_1)$ no es abeliano. En particular $\pi_1(4_1) \not\cong \mathbb{Z}$ y entonces 4_1 no es el nudo trivial.

Ahora vamos a utilizar el $\pi_1(4_1)$ para demostrar que los nudos 3_1 y 4_1 no son equivalentes. Por lo visto en el ejemplo 4.7, si los grupos $\pi_1(4_1)$ y $\pi_1(3_1)$ fueran isomorfos, existiría un epimorfismo $\pi_1(4_1) \rightarrow \mathbb{S}_3$. Sin embargo, un cálculo directo muestra que ningún morfismo $\pi_1(4_1) \rightarrow \mathbb{S}_3$ es sobreyectivo.

4.12. **Ejercicio.** En la figura 15 vimos dos nudos compuestos: el nudo de la abuela y el nudo cuadrado. Pruebe que estos nudos tienen grupos fundamentales isomorfos.

4.13. *Observación.* Como veremos más adelante, el nudo de la abuela y el nudo cuadrado no son equivalentes. Luego, el grupo fundamental de un nudo es un buen invariante pero no es infalible, es decir: existen nudos no equivalentes con grupos fundamentales isomorfos.

5. QUANDLES

Sabemos que gracias a los movimientos de Reidemeister el problema de distinguir nudos puede formularse en términos de combinatoria. Hemos visto además dos invariantes de nudos: el grupo fundamental y el coloreo. En esta sección vamos a definir el quandle fundamental de un nudo y vamos a probar que es un invariante que generaliza al grupo fundamental y a los invariantes por coloreo.

5.1. Los quandles son estructuras algebraicas que modelan la conjugación en un grupo. La primera aparición de cierta familia de quandles fue en 1943 cuando Mituhisa Takasaki introdujo los quandles involutivos –los llamó *keis*– con el fin de entender reflexiones. En 1959, los matemáticos ingleses John Conway y Gávil Wraith, después de un interesante intercambio de cartas e ideas, definieron los *wracks*. La idea de Conway y Wraith es que un *wrack* (hoy llamado simplemente *rack*) es esencialmente lo que queda de un grupo una vez que uno olvida la multiplicación y se preocupa únicamente por la conjugación. En 1982, Joyce introdujo los *quandles* con el fin de producir invariantes de nudos. Inspirado en la presentación de Wirtinger del grupo fundamental de un nudo, Joyce construyó el *quandle fundamental* de un nudo y probó que esta construcción da un buen invariante de nudos no orientados. Ese mismo año, y en forma independiente, Sergei Matveev también introdujo los quandles –los llamó *grupoides distributivos*– y probó un resultado similar al de Joyce. En 1988, para estudiar ciertos aspectos de la teoría de singularidades de curvas, el matemático alemán Egbert Brieskorn introdujo una estructura equivalente a la de Conway y Wraith: los *automorphic sets*.



FIGURA 29. Algunos de los padres de la teoría de quandles. De izquierda a derecha: John Conway, Gavin Wraith, David Joyce, Egbert Brieskorn.

5.2. Un **quandle** es un par (X, \triangleright) , donde X es un conjunto no vacío con una operación binaria $\triangleright: X \times X \rightarrow X$ tal que

$$(5.3) \quad \text{la función } \varphi_x: X \rightarrow X, y \mapsto x \triangleright y, \quad \text{es biyectiva para todo } x \in X,$$

$$(5.4) \quad x \triangleright (y \triangleright z) = (x \triangleright y) \triangleright (x \triangleright z) \quad \text{para todo } x, y, z \in X,$$

$$(5.5) \quad x \triangleright x = x \quad \text{para todo } x \in X.$$

5.6. Sean X e Y dos quandles. Una función $f: X \rightarrow Y$ es un **morfismo** de quandles si $f(x \triangleright x') = f(x) \triangleright f(x')$ para todo $x, x' \in X$.

5.7. **Ejemplo.** Sea X un conjunto no vacío. Entonces X es un quandle con $x \triangleright y = y$ para todo $x, y \in X$. Este quandle se denomina **quandle trivial** sobre X .

5.8. **Ejemplo.** Sea G un grupo y X una clase de conjugación de G . Entonces X es un quandle con $x \triangleright y = xyx^{-1}$ para todo $x, y \in X$. El quandle asociado a la clase de conjugación de g en G se llama **quandle de conjugación** y se denota por g^G .

5.9. **Ejercicio.** Si X es un quandle de conjugación entonces

$$(5.10) \quad x \triangleright y = y \Leftrightarrow y \triangleright x = x \quad \text{para todo } x, y \in X.$$

Encuentre un quandle de tres elementos que no cumpla con la condición (5.10).

5.11. **Ejercicio.** Sea $n \in \mathbb{N}$. Pruebe que \mathbb{Z}_n es un quandle con la acción dada por $x \triangleright y = 2x - y$ para todo $x, y \in \mathbb{Z}_n$. Este quandle se denomina **quandle diedral** y se denota por \mathbb{D}_n .

5.12. Sea M un $\mathbb{Z}[t, t^{-1}]$ -módulo a izquierda. Definimos el **quandle de Alexander** sobre M como el quandle dado por

$$(5.13) \quad x \triangleright y = (1-t)x + ty \quad \text{para todo } x, y \in M.$$

Demostremos que la acción (5.13) define una estructura de quandle sobre M . Es evidente que para cada $x \in M$ la función $\varphi_x: y \mapsto (1-t)x + ty$ es inversible y la inversa φ_x^{-1} está dada por $y \mapsto (1-t^{-1})x + t^{-1}y$. Además $x \triangleright x = x$ para todo $x \in X$. Para demostrar la distributividad, tomamos $x, y, z \in M$ y calculamos

$$\begin{aligned} (x \triangleright y) \triangleright (x \triangleright z) &= ((1-t)x + ty) \triangleright ((1-t)x + tz) \\ &= (1-t)((1-t)x + ty) + t((1-t)x + tz) \\ &= (1-t)x + t(1-t)y + t^2z \\ &= (1-t)x + t(y \triangleright z) \\ &= x \triangleright (y \triangleright z). \end{aligned}$$



FIGURA 30. James Alexander (1888–1971)

5.14. Veamos un caso particular de la construcción que vimos en 5.12. Sea \mathbb{F}_q el cuerpo de q elementos, donde q es una potencia de un número primo. Para cada $\alpha \in \mathbb{F}_q \setminus \{0\}$ definimos el **quandle de Alexander** de tipo (q, α) como el quandle sobre el cuerpo \mathbb{F}_q dado por $x \triangleright y = (1-\alpha)x + \alpha y$ para todo $x, y \in \mathbb{F}_q$.

5.15. **Ejercicio.** Pruebe que el quandle $(123)^{\mathbb{A}_4}$ es un quandle de Alexander.

5.16. Así como puede calcularse el grupo fundamental de un nudo gracias a la presentación de Wirtinger, es posible considerar el quandle fundamental de un nudo. Supongamos que K es un nudo con n arcos y m cruces. Como hicimos en 4.2, etiquetamos los arcos de la proyección con las variables a_1, a_2, a_3, \dots . En cada cruce χ como el que vemos en la figura 23 consideramos la relación

$$(5.17) \quad r_\chi : a_i \triangleright a_j = a_k.$$

El **quandle fundamental** del nudo K es el quandle

$$Q(K) = \langle a_1, a_2, \dots, a_n : r_1, \dots, r_m \rangle,$$

donde las relaciones r_1, \dots, r_m están dadas por las fórmulas (5.17).

5.18. **Ejemplo.** El quandle fundamental del nudo 3_1 de la figura 26 es

$$(5.19) \quad Q(3_1) = \langle a_1, a_2, a_3 : a_1 \triangleright a_2 = a_3, a_2 \triangleright a_3 = a_1, a_3 \triangleright a_1 = a_2 \rangle.$$

5.20. **Ejemplo.** En el ejemplo 4.11 calculamos el grupo fundamental del nudo 4_1 . El quandle fundamental del nudo 4_1 de la figura 28, es

$$(5.21) \quad Q(4_1) = \langle a_1, \dots, a_4 : a_1 \triangleright a_3 = a_4, a_3 \triangleright a_1 = a_2, a_2 \triangleright a_1 = a_4, a_4 \triangleright a_3 = a_2 \rangle.$$

Observemos que las dos primeras relaciones corresponden a cruces positivos y las dos últimas a cruces negativos.

5.22. *Observación.* El quandle fundamental de un nudo no necesariamente es un quandle finito.

5.23. No es difícil demostrar que el quandle fundamental de un nudo queda invariante por los movimientos de Reidemeister. La demostración es apenas más complicada que la del teorema 3.8. La diferencia está en que ahora habrá más diagramas de Reidemeister para chequear pues deben considerarse todas las orientaciones posibles.

Para el primer movimiento de Reidemeister deben chequearse los diagramas de la figura 31.



FIGURA 31. Las cuatro orientaciones posibles en el primer movimiento de Reidemeister.

Las posibles orientaciones que pueden aparecer en el segundo movimiento de Reidemeister se muestran en la figura 32.

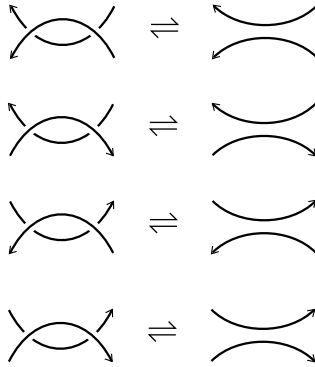


FIGURA 32. Las cuatro orientaciones posibles en el segundo movimiento de Reidemeister.

Finalmente, para el tercer movimiento hay ocho posibles diagramas. Por ejemplo, la condición a verificar en la figura 33 es

$$a \triangleright^{-1} (b \triangleright c) = (a \triangleright^{-1} b) \triangleright (a \triangleright^{-1} c),$$

que es consecuencia de la definición 5.2.

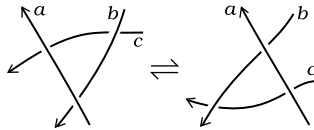


FIGURA 33. Una de las orientaciones posibles para el tercer movimiento de Reidemeister.

5.24. En 1982 Matveev probó el siguiente resultado: Si K y L son dos nudos, entonces $Q(K) \simeq Q(L)$ si y sólo si $K = L$ o $L = rm(K)$. Para la demostración referimos a [8].

5.25. Sea X un quandle. El **grupo envolvente** de X es el grupo

$$G_X = F_X / \langle xy = (x \triangleright y), x, y \in X \rangle,$$

donde F_X es el grupo libre con base en los elementos de X . En 1982 Joyce demostró que el grupo envolvente del quandle fundamental satisface $G_{Q(K)} \simeq \pi_1(K)$ para todo nudo K .

6. EJEMPLOS DE QUANDLE FUNDAMENTALES

6.1. Consideremos el nudo 5_1 de la figura 34. Todos los cruces del diagrama son positivos y el quandle fundamental de 5_1 es

$$(6.2) \quad Q(5_1) = \langle a_1, \dots, a_5 : a_1 \triangleright a_3 = a_4, a_4 \triangleright a_1 = a_2, a_2 \triangleright a_4 = a_5, \\ a_5 \triangleright a_2 = a_3, a_3 \triangleright a_5 = a_1 \rangle.$$

Consideremos ahora el nudo 5_2 de la figura 35. Todos los cruces del diagrama son positivos y entonces el quandle fundamental $Q(5_2)$ es

$$(6.3) \quad Q(5_2) = \langle a_1, \dots, a_5 : a_1 \triangleright a_4 = a_5, a_4 \triangleright a_1 = a_2, a_2 \triangleright a_3 = a_4, \\ a_5 \triangleright a_2 = a_3, a_3 \triangleright a_5 = a_1 \rangle.$$

6.4. El fundamental $Q(6_1)$ del nudo 6_1 de la figura 36 es

$$(6.5) \quad Q(6_1) = \langle a_1, \dots, a_6 : a_1 \triangleright a_4 = a_3, a_3 \triangleright a_2 = a_1, a_2 \triangleright a_5 = a_6, \\ a_5 \triangleright a_2 = a_3, a_4 \triangleright a_1 = a_6, a_6 \triangleright a_5 = a_4 \rangle,$$

donde las ecuaciones $a_2 \triangleright a_5 = a_6$ y $a_5 \triangleright a_2 = a_3$ corresponden a los únicos cruces positivos. El quandle fundamental del nudo 6_2 tal como lo vemos en la figura 37 es

$$(6.6) \quad Q(6_2) = \langle a_1, \dots, a_6 : a_1 \triangleright a_4 = a_5, a_5 \triangleright a_3 = a_2, a_2 \triangleright a_6 = a_5, \\ a_6 \triangleright a_3 = a_4, a_3 \triangleright a_1 = a_2, a_4 \triangleright a_6 = a_1 \rangle,$$

donde las ecuaciones $a_5 \triangleright a_3 = a_2$ y $a_2 \triangleright a_6 = a_5$ corresponden a los únicos cruces positivos del diagrama. Por último, el quandle fundamental del nudo 6_3 de la figura 38 es

$$(6.7) \quad Q(6_3) = \langle a_1, \dots, a_6 : a_1 \triangleright a_5 = a_4, a_5 \triangleright a_2 = a_1, a_2 \triangleright a_3 = a_4, \\ a_6 \triangleright a_2 = a_3, a_3 \triangleright a_6 = a_1, a_4 \triangleright a_6 = a_5 \rangle,$$

donde las ecuaciones $a_2 \triangleright a_3 = a_4$, $a_6 \triangleright a_2 = a_3$ y $a_3 \triangleright a_6 = a_1$ corresponden a los únicos cruces positivos del diagrama.

6.8. Presentemos los quandles fundamentales de los nudos de la figuras 39–43. Un cálculo directo muestra que

$$(6.9) \quad Q(7_1) = \langle a_1, \dots, a_7 : a_1 \triangleright a_4 = a_5, a_5 \triangleright a_1 = a_2, a_2 \triangleright a_5 = a_6, \\ a_6 \triangleright a_2 = a_3, a_3 \triangleright a_6 = a_7, a_7 \triangleright a_3 = a_4, a_4 \triangleright a_7 = a_1 \rangle,$$

donde todos los cruces involucrados son positivos. Similarmente,

$$(6.10) \quad Q(7_2) = \langle a_1, \dots, a_7 : a_1 \triangleright a_4 = a_3, a_3 \triangleright a_2 = a_1, a_2 \triangleright a_6 = a_5, \\ a_5 \triangleright a_7 = a_6, a_7 \triangleright a_5 = a_4, a_4 \triangleright a_1 = a_7, a_6 \triangleright a_3 = a_2 \rangle,$$

donde todos los cruces son negativos. Para el nudo 7_3 tenemos

$$(6.11) \quad Q(7_3) = \langle a_1, \dots, a_7 : a_1 \triangleright a_5 = a_6, a_5 \triangleright a_1 = a_2, a_2 \triangleright a_4 = a_5, \\ a_6 \triangleright a_2 = a_3, a_3 \triangleright a_6 = a_7, a_7 \triangleright a_3 = a_4, a_4 \triangleright a_7 = a_1 \rangle,$$

donde todos los cruces son positivos. Para el nudo 7_4 se tiene

$$(6.12) \quad Q(7_4) = \langle a_1, \dots, a_7 : a_5 \triangleright a_1 = a_2, a_2 \triangleright a_4 = a_5, a_4 \triangleright a_1 = a_7, \\ a_6 \triangleright a_3 = a_4, a_3 \triangleright a_6 = a_7, a_7 \triangleright a_2 = a_3, a_1 \triangleright a_5 = a_6 \rangle,$$

donde la ecuación $a_4 \triangleright a_1 = a_7$ corresponde al único cruce negativo que tiene el diagrama. Para el nudo 7_5 tenemos

$$(6.13) \quad Q(7_5) = \langle a_1, \dots, a_7 : a_1 \triangleright a_4 = a_3, a_5 \triangleright a_2 = a_1, a_2 \triangleright a_6 = a_5, \\ a_7 \triangleright a_3 = a_2, a_3 \triangleright a_1 = a_7, a_4 \triangleright a_7 = a_6, a_6 \triangleright a_4 = a_5 \rangle,$$

donde la ecuación $a_6 \triangleright a_4 = a_5$ corresponde al único cruce negativo del diagrama. Para el nudo 7_6 tenemos

$$(6.14) \quad Q(7_6) = \langle a_1, \dots, a_7 : a_6 \triangleright a_2 = a_1, a_4 \triangleright a_3 = a_2, a_2 \triangleright a_6 = a_5, \\ a_3 \triangleright a_1 = a_7, a_1 \triangleright a_2 = a_3, a_7 \triangleright a_4 = a_5, a_5 \triangleright a_6 = a_7 \rangle,$$

donde las relaciones $a_1 \triangleright a_2 = a_3$, $a_7 \triangleright a_4 = a_5$ y $a_5 \triangleright a_6 = a_7$ corresponden a los cruces positivos del diagrama. Finalmente, el quandle fundamental del nudo 7_7 es

$$(6.15) \quad Q(7_7) = \langle a_1, \dots, a_7 : a_1 \triangleright a_4 = a_5, a_6 \triangleright a_2 = a_1, a_2 \triangleright a_4 = a_3, \\ a_7 \triangleright a_2 = a_3, a_3 \triangleright a_6 = a_7, a_5 \triangleright a_7 = a_1, a_4 \triangleright a_6 = a_5 \rangle,$$

donde las relaciones $a_6 \triangleright a_2 = a_1$, $a_2 \triangleright a_4 = a_3$ y $a_4 \triangleright a_6 = a_5$ son las que corresponden a los cruces negativos del diagrama.

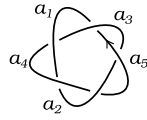


FIGURA 34. 5_1

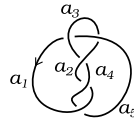


FIGURA 35. 5_2

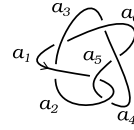


FIGURA 36. 6_1

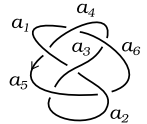


FIGURA 37. 6_2

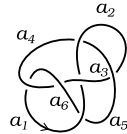


FIGURA 38. 6_3

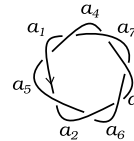


FIGURA 39. 7_1

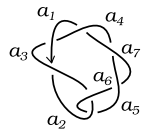


FIGURA 40. 7_2

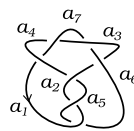


FIGURA 41. 7_3

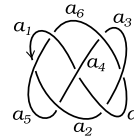


FIGURA 42. 7_4

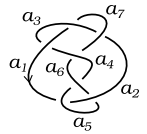


FIGURA 43. 7_5

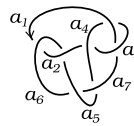


FIGURA 44. 7_6

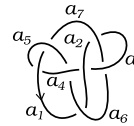


FIGURA 45. 7_7

6.16. Presentemos el quandle fundamental de la imagen especular del nudo 3_1 de la figura 46. El diagrama tiene tres cruces negativos y el quandle fundamental es

$$Q(m(3_1)) = \langle a_1, a_2, a_3 : a_3 \triangleright a_2 = a_1, a_2 \triangleright a_1 = a_3, a_1 \triangleright a_3 = a_2 \rangle.$$

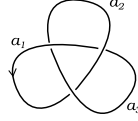


FIGURA 46. El nudo $m(3_1)$.

6.17. La figura 47 muestra el nudo de la abuela y la figura 48 el nudo cuadrado. Un cálculo sencillo muestra que el quandle fundamental del nudo de la abuela es

$$(6.18) \quad Q(3_1 \# 3_1) = \langle a_1, \dots, a_6 : a_1 \triangleright a_5 = a_6, a_6 \triangleright a_1 = a_2, a_2 \triangleright a_3 = a_4, \\ a_4 \triangleright a_2 = a_3, a_3 \triangleright a_4 = a_5, a_5 \triangleright a_6 = a_1 \rangle,$$

donde todas las ecuaciones corresponden a cruces positivos, y que el quandle fundamental del nudo cuadrado es

$$(6.19) \quad Q(3_1 \# m(3_1)) = \langle a_1, \dots, a_6 : a_5 \triangleright a_6 = a_1, a_1 \triangleright a_5 = a_6, a_6 \triangleright a_1 = a_2, \\ a_4 \triangleright a_3 = a_2, a_3 \triangleright a_5 = a_4, a_5 \triangleright a_4 = a_3 \rangle,$$

donde las tres primeras ecuaciones corresponden a los cruces positivos y las tres últimas a los cruces negativos.

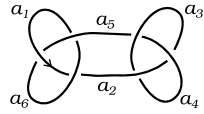


FIGURA 47. $3_1 \# 3_1$

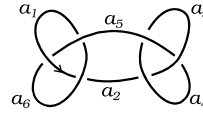


FIGURA 48. $3_1 \# m(3_1)$

7. COLOREOS GENERALIZADOS

En esta sección utilizaremos el quandle fundamental para dar una generalización de los invariantes por coloreo.

7.1. Si etiquetamos los arcos de un nudo con los elementos de un quandle X de forma tal que en cada cruce se cumplan las relaciones que mencionamos en 5.16, o equivalentemente, en la figura 49, la cantidad de formas en que pueden ponerse esas etiquetas quedará invariante después de aplicar movimientos de Reidemeister. Esto nos permite “colorear” nudos de forma abstracta, donde ahora los “colores” son en realidad los elementos del quandle X .

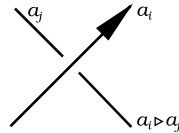


FIGURA 49. La regla para colorear con un quandle.

7.2. Un **coloreo** del nudo K con el quandle X es entonces un morfismo de quandles $Q(K) \rightarrow X$. Por lo dicho anteriormente, la cantidad de morfismos $Q(K) \rightarrow X$ es un invariante de nudos. Este invariante se denota por $\text{Col}_X(K)$. Observemos que siempre existirán al menos $|X|$ coloreos del nudo K con el quandle X (los coloreos triviales).

7.3. **Ejemplo.** El coloreo por tres colores es en realidad el invariante asociado al quandle \mathbb{D}_3 . El coloreo de Fox con p colores que vimos en 3.7 es en realidad el coloreo asociado al quandle \mathbb{D}_p .

7.4. **Ejemplo.** Veamos que el nudo 4_1 puede colorearse de forma no trivial con un quandle de Alexander. Consideremos el cuerpo

$$\mathbb{F}_4 = \mathbb{F}_2[\alpha]/(\alpha^2 + \alpha + 1) = \{0, 1, \alpha, \alpha + 1\},$$

y sea X el quandle de Alexander de tipo $(4, \alpha)$. Vimos en el ejemplo 3.9 que los coloreos con X del diagrama de la figura 28 son las soluciones $(a, b, c, d) \in \mathbb{F}_4$ del sistema de ecuaciones

$$(7.5) \quad \begin{aligned} (1 - \alpha)a + \alpha c &= d, & (1 - \alpha)b + \alpha a &= d, \\ (1 - \alpha)c + \alpha a &= b, & (1 - \alpha)d + \alpha c &= b. \end{aligned}$$

Como $(a, b, c, d) = (0, 1, \alpha, \alpha + 1)$ es una solución de (7.5), el nudo 4_1 admite entonces al menos un coloreo con X no trivial. Tenemos así otra demostración de la no trivialidad del nudo 4_1 .

7.6. Los coloreos con quandles de Alexander se llaman **coloreos de Alexander**.

7.7. **Ejercicio.** Pruebe que el quandle de conjugación asociado a la matriz $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$ de $\mathbf{SL}(2, \mathbb{Z}_3)$ es isomorfo al quandle de Alexander de tipo $(4, \alpha)$ visto en el ejemplo 7.4. De alguna forma, habíamos utilizado este quandle en 4.11.

7.8. **Ejemplo.** En 6.1 presentamos el quandle fundamental $Q(5_1)$. Un cálculo sencillo muestra que la función $Q(5_1) \rightarrow (12345)^{\mathbb{A}_5}$ definida por

$$a \mapsto (15432), \quad b \mapsto (12453), \quad c \mapsto (14352), \quad d \mapsto (15324), \quad e \mapsto (14523),$$

es un morfismo de quandles. Esta función nos permite “colorear” el nudo 5_1 con los 5-ciclos del grupo alternado \mathbb{A}_5 .

7.9. **Ejemplo.** En 6.4 mostramos las relaciones que definen el quandle fundamental del nudo 6_3 . Estas relaciones nos permiten demostrar, por ejemplo, que este nudo puede colorearse de forma no trivial con el quandle de Alexander de tipo $(7, 2)$. En efecto, si traducimos (6.7) a un sistema de ecuaciones obtenemos:

$$(7.10) \quad \begin{aligned} -a_1 + 2a_5 &= a_4, & -a_5 + 2a_2 &= a_1, & -a_2 + 2a_3 &= a_4, \\ -a_6 + 2a_2 &= a_3, & -a_3 + 2a_6 &= a_1, & -a_4 + 2a_6 &= a_5. \end{aligned}$$

Como $(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6) = (1, 2, 0, 5, 3, 4)$ es una solución de (7.10), el nudo 6_3 puede colorearse de forma no trivial con el quandle de Alexander de tipo $(7, 2)$. Observemos que si X es el quandle de Alexander de tipo $(7, 2)$, entonces la función $Q(K) \rightarrow X$ dada por

$$a_1 \mapsto 1, \quad a_2 \mapsto 2, \quad a_3 \mapsto 0, \quad a_4 \mapsto 5, \quad a_5 \mapsto 3, \quad a_6 \mapsto 6$$

es un morfismo de quandles.

7.11. **Ejercicio.** Pruebe que el quandle de Alexander de tipo $(4, \alpha)$ definido sobre el cuerpo $\mathbb{F}_4 = \mathbb{F}_2[\alpha]/(\alpha^2 + \alpha + 1) = \{0, 1, \alpha, \alpha + 1\}$ permite distinguir los siguientes pares de nudos: a) 3_1 y 6_1 ; b) 4_1 y 5_1 ; c) 6_2 y 7_2 ; d) 6_3 y 7_3 .

7.12. **Ejercicio.** Pruebe que con una clase de conjugación del grupo alternado \mathbb{A}_5 es posible distinguir los nudos 5_2 y 7_1 .

7.13. **Ejercicio.** Utilice los resultados de los ejercicios 3.12, 7.11 y 7.12 y demuestre que todos los nudos de la figura 14 son no triviales y distintos.

7.14. Sean A un grupo abeliano (escrito multiplicativamente), X un quandle, y $f: X \times X \rightarrow A$ una función. Sobre el conjunto $X \times A$ definimos la operación

$$(7.15) \quad (x, a) \triangleright (y, b) = (x \triangleright y, bf(x, y)) \quad \text{para todo } (x, a), (y, b) \in X \times A.$$

Es fácil demostrar que la operación (7.15) define una estructura de quandle sobre $X \times A$ si y sólo si:

$$(7.16) \quad f(x, x) = 1, \quad \text{para todo } x \in X,$$

$$(7.17) \quad f(x, z)f(x \triangleright y, x \triangleright z) = f(y, z)f(x, y \triangleright z) \quad \text{para todo } x, y, z \in X.$$

Como ejemplo, demostremos la distributividad. Sean $x, y, z \in X$ y $a, b, c \in A$. Un cálculo directo nos dice que

$$\begin{aligned} (x, a) \triangleright ((y, b) \triangleright (c, z)) &= (x, a) \triangleright (y \triangleright z, cf(y, z)) \\ &= (x \triangleright (y \triangleright z), cf(y, z)f(x, y \triangleright z)), \end{aligned}$$

y, por otro lado,

$$\begin{aligned} ((x, a) \triangleright (y, b)) \triangleright ((x, a) \triangleright (c, z)) &= (x \triangleright y, bf(x, y)) \triangleright (x \triangleright z, cf(x, z)) \\ &= ((x \triangleright y) \triangleright (x \triangleright z), cf(x, z)f(x \triangleright y, x \triangleright z)). \end{aligned}$$

Como X es un quandle, tenemos entonces que la condición (7.17) es equivalente a la distributividad de la operación binaria en $X \times A$.

7.18. Una función $f: X \times X \rightarrow A$ que satisface las condiciones (7.16) y (7.17) se llama **2-cociclo del quandle** X con coeficientes en A .

7.19. El quandle obtenido en 7.14 se llama **extensión abeliana** de X por el grupo abeliano A y el 2-cociclo f , y se denota por $X \times_f A$.

7.20. **Ejemplo.** Supongamos que $\mathbb{F}_4 = \mathbb{F}_2[\alpha]/(\alpha^2 + \alpha + 1) = \{0, 1, \alpha, \alpha + 1\}$ y sea X el quandle de Alexander de tipo $(4, \alpha)$. Sea $A = \langle \sigma \rangle = \{1, \sigma\}$ el grupo cíclico de orden dos. La función $f: X \times X \rightarrow A$ dada por

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = y \text{ o } x = 1 \text{ o } y = 1, \\ \sigma & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

es un 2-cociclo de X con coeficientes en el grupo abeliano A .

7.21. **Ejemplo.** Sea X el quandle $(1234)^{\mathbb{S}_4}$ y sea $A = \langle \sigma \rangle = \{1, \sigma, \sigma^2, \sigma^3\}$ el grupo cíclico de orden cuatro (escrito multiplicativamente). La función $f: X \times X \rightarrow A$ dada por la tabla

f	(1234)	(1432)	(1342)	(1243)	(1324)	(1423)
(1234)	1	σ	σ^2	σ^2	σ	σ^3
(1432)	σ	1	σ^2	1	σ^3	σ^3
(1342)	σ^2	σ	1	σ	σ^2	σ^3
(1243)	σ^3	σ^2	σ	1	1	σ^3
(1324)	σ	σ	σ	σ	1	σ
(1423)	1	1	1	1	σ	1

es un 2-cociclo de X con coeficientes en A .

7.22. El 2-cociclo $f: X \times X \rightarrow A$ es un **coborde** si existe $\gamma: X \rightarrow A$ tal que $f(x, y) = \gamma(x \triangleright y) \gamma(y)^{-1}$ para todo $x, y \in X$. Dos 2-cociclos f y g son **cohomólogos** (o equivalentes) si existe $\gamma: X \rightarrow A$ tal que

$$f(x, y) = \gamma(x \triangleright y) g(x, y) \gamma(y)^{-1}$$

para todo $x, y \in X$.

7.23. Como vimos en 7.14, cada 2-cociclo de un quandle X nos permite definir una extensión abeliana de X . Estos 2-cociclos son en realidad 2-cociclos en una teoría de cohomología de quandles [5]. Tal como pasa en la teoría de grupos, las clases de equivalencia de extensiones abelianas del quandle X por el grupo abeliano A están en correspondencia biyectiva con las clases de equivalencia de 2-cociclos de X con coeficientes en A . La teoría de extensiones abelianas de quandles tiene además aplicaciones a la teoría de nudos [4]. Para más información sobre la teorías de extensiones y (co)homologías de quandles referimos a [2].

7.24. **Ejemplo.** Recordemos el nudo de la abuela y el nudo cuadrado de la figura 15. En el ejercicio 4.12 vimos que estos nudos tienen grupos fundamentales isomorfos. Sin embargo, como veremos a continuación, estos nudos no son equivalentes.

Sean X el quandle $(1234)^{\mathbb{S}_4}$ y f el 2-cociclo de X que vimos en el ejemplo 7.21. Teniendo en mente 7.14, consideremos la extensión $X \times_f A$ dada por

$$(x, \sigma^i) \triangleright (y, \sigma^j) = (x \triangleright y, \sigma^j f(x, y)) \quad \text{para todo } x, y \in X, i, j \in \{0, \dots, 3\}.$$

Gracias a una sugerencia de Edwin Clark, usaremos el quandle $X \times_f A$ para distinguir el nudo de la abuela del nudo cuadrado. Un cálculo computacional nos muestra que para el nudo de la abuela se tiene

$$(7.25) \quad \text{Col}_{X \times_f A}(3_1 \# 3_1) = 24,$$

y que para el nudo cuadrado, en cambio, se tiene

$$(7.26) \quad \text{Col}_{X \times_f A}(3_1 \# m(3_1)) = 408.$$

Vimos en el ejercicio 4.12 que el nudo de la abuela es trivial si y sólo si el nudo cuadrado lo es. Esta observación y las fórmulas (7.25) y (7.26) implican que estos nudos son no triviales y distintos.

8. INVARIANTES POR 2-COCICLOS

A fines del siglo XX, S. Carter, D. Jelsovsky, S. Kamada, L. Langford y M. Saito anunciaron la construcción de un nuevo invariante de nudos: el invariante por 2-cociclos. En esta sección introduciremos los invariantes dados por 2-cociclos y calcularemos algunos ejemplos.

8.1. Fijemos un grupo abeliano A (escrito multiplicativamente) y un nudo K . Sean X un quandle finito, $\mathcal{C}: Q(K) \rightarrow X$ un coloreo de K y $f: X \times X \rightarrow A$ un 2-cociclo de X con coeficientes en A . En cada cruce como el que vemos en la figura 23 se define el **peso de Boltzmann** $\omega_f(\mathcal{C}, \chi)$ (con respecto al coloreo \mathcal{C} , al 2-cociclo f y al cruce χ) como el elemento de A dado por la expresión

$$\omega_f(\mathcal{C}, \chi) = f(a_i, a_j)^{\text{signo}(\chi)}.$$

La **función de partición** $\Phi_{X,f}(K)$ del nudo K (asociada al quandle X y al 2-cociclo f) es la expresión

$$(8.2) \quad \Phi_{X,f}(K) = \sum_{\mathcal{C}} \prod_{\chi} \omega_f(\mathcal{C}, \chi),$$

donde el producto se toma sobre todos los cruces χ que tiene el diagrama del nudo K y la suma se toma sobre todos los coloreos \mathcal{C} de K dados por el quandle X . La fórmula (8.2) define un elemento de $\mathbb{Z}[A]$, el anillo de grupo de A .

8.3. Teorema. *La función de partición $\Phi_{X,f}$ es un invariante de nudos.*

Demostración. Tenemos que demostrar que el producto de los pesos de Boltzmann es invariante bajo las versiones orientadas de los movimientos de Reidemeister.

Consideremos el primer movimiento de Reidemeister. Tal como muestra la figura 31, hay dos orientaciones posibles para tener en cuenta. En ambos casos, si suponemos que estas cuerdas llevan la etiqueta $a \in X$, entonces en el único cruce χ que tiene el diagrama tendremos el valor $f(a, a)^{\text{signo}(\chi)}$. Como f es un 2-cociclo, $f(a, a) = 1$. Luego, el primer movimiento de Reidemeister deja invariante al producto de los pesos de Boltzmann.

Consideremos ahora el segundo movimiento. Aquí tenemos cuatro posibles diagramas orientados, similares a los que se ve en la figura 32. Si etiquetamos la cuerda que pasa por arriba con $a \in X$ y la cuerda entrante que pasa por debajo con $b \in X$ entonces, como para ambos diagramas tenemos un cruce positivo y uno negativo, el producto de los pesos de Boltzmann es $f(a, b)f(a, b)^{-1} = 1$. Luego, el segundo movimiento de Reidemeister también deja invariante al producto de los pesos de Boltzmann.

Para finalizar, tenemos que demostrar que el tercer movimiento de Reidemeister deja invariante al producto de los pesos de Boltzmann. Como vimos en 5.23, hay ocho casos para chequear. Hagamos como ejemplo el caso que se corresponde con la figura 50 y dejemos el resto como ejercicio.

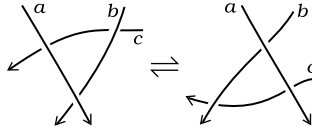


FIGURA 50. Otra de las orientaciones posibles para el tercer movimiento de Reidemeister.

Si calculamos el producto de los pesos de Boltzmann sobre los tres cruces que tienen los diagramas de la figura 50 vemos que este producto es invariante por el tercer movimiento de Reidemeister si y sólo si

$$f(a, b \triangleright c)f(b, c)f(a, b) = f(a, b)f(a \triangleright b, a \triangleright c)f(a, c).$$

Como A es un grupo abeliano, al cancelar $f(a, b)$ en ambos miembros, obtenemos el resultado deseado. \square

8.4. Los invariantes por quandles y 2-cociclos extienden a los invariantes por coloreo con quandles. Más precisamente, si f es un coborde entonces $\Phi_{X,f}(K) = \text{Col}_X(K)$ para todo nudo K .

8.5. La afirmación hecha en 8.4 puede generalizarse: si f y g son cohomólogos entonces $\Phi_{X,f} = \Phi_{X,g}$. Para las demostración referimos a [5, Proposición 4.5].

8.6. **Ejemplo.** Sea X el quandle de Alexander de tipo $(4, \alpha)$ y f el 2-cociclo que vimos en el ejemplo 7.20. Un cálculo computacional nos permite calcular $\Phi_{X,f}$ para los nudos de la figura 14:

$$\Phi_{X,f}(K) = \begin{cases} 4 + 12\sigma & \text{si } K \in \{3_1, 4_1, 7_2, 7_3\}, \\ 4 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

8.7. **Ejemplo.** En este ejemplo vamos a distinguir el nudo 3_1 de su imagen especular $m(3_1)$, ver figura 12. Consideremos el quandle X y f el 2-cociclo de X que vimos en el ejemplo 7.21. Un cálculo directo muestra que

$$\Phi_{X,f}(3_1) = 6 + 24\sigma^3, \quad \Phi_{X,f}(m(3_1)) = 6 + 24\sigma.$$

Esto nos dice que los nudos 3_1 y $m(3_1)$ no son equivalentes.

8.8. **Ejemplo.** Como hicimos en el ejemplo anterior, vamos a utilizar el quandle X y f el 2-cociclo de X que vimos en el ejemplo 7.21. El invariante dado por X y el 2-cociclo f para el nudo de la abuela es

$$\Phi_{X,f}(3_1\#3_1) = 6 + 48\sigma + 96\sigma^2,$$

mientras que para el nudo cuadrado es

$$\Phi_{X,f}(3_1\#m(3_1)) = 102 + 24\sigma + 24\sigma^3.$$

Esto nos muestra que el nudo de la abuela no es equivalente al nudo cuadrado.

REFERENCIAS

- [1] C. C. Adams. *The knot book*. American Mathematical Society, Providence, RI, 2004. An elementary introduction to the mathematical theory of knots, Revised reprint of the 1994 original.
- [2] N. Andruskiewitsch and M. Graña. From racks to pointed Hopf algebras. *Adv. Math.*, 178(2):177–243, 2003.
- [3] G. Burde, H. Zieschang, and M. Heusener. *Knots*, volume 5 of *De Gruyter Studies in Mathematics*. De Gruyter, Berlin, extended edition, 2014.
- [4] J. S. Carter, M. Elhamdadi, M. A. Nikiforou, and M. Saito. Extensions of quandles and cocycle knot invariants. *J. Knot Theory Ramifications*, 12(6):725–738, 2003.
- [5] J. S. Carter, D. Jelsovsky, S. Kamada, L. Langford, and M. Saito. Quandle cohomology and state-sum invariants of knotted curves and surfaces. *Trans. Amer. Math. Soc.*, 355(10):3947–3989, 2003.
- [6] R. H. Crowell and R. H. Fox. *Introduction to knot theory*. Springer-Verlag, New York-Heidelberg, 1977. Reprint of the 1963 original, Graduate Texts in Mathematics, No. 57.
- [7] C. M. Gordon and J. Luecke. Knots are determined by their complements. *J. Amer. Math. Soc.*, 2(2):371–415, 1989.
- [8] S. V. Matveev. Distributive groupoids in knot theory. *Mat. Sb. (N.S.)*, 119(161)(1):78–88, 160, 1982.

ÍNDICE ALFABÉTICO

- 2-cociclo, 51
- Boltzmann
 - peso de, 52
- Coborde, 52
- Coloreo
 - con n colores, 50
 - con tres colores, 37, 50
 - de Alexander, 50
 - de Fox, 39, 50
 - generalizado, 50
- Composición de nudos, 36
- Dehn
 - teorema de, 42
- Diagrama de un nudo, 33
- Equivalencia de nudos, 33
- Extensiones de quandles, 51
- Fox
 - teorema de, 39
- Función de partición, 52
- Gordon–Luecke
 - teorema de, 42
- Grupo
 - envolvente de un quandle, 47
 - fundamental de un nudo, 41
- Imagen especular, 35
- Invariantes
 - dados por coloreos, 37, 39
 - dados por quandles, 50
 - dados por quandles y 2-cociclos, 52
- Matriz de coloreos, 38
- Matveev
 - teorema de, 46
- Número de cruces, 37
- Nudo, 33
 - 3₁, 35, 42, 49
 - 4₁, 35, 43
 - 5₁, 47
 - 5₂, 47
 - 6₁, 47
 - 6₂, 47
 - 6₃, 47
 - 7₁, 47
 - 7₂, 47
 - 7₃, 47
 - 7₄, 48
 - 7₅, 48
 - 7₆, 48
 - 7₇, 48
 - 9₃₂, 35
 - compuesto, 36
 - cuadrado, 37, 43, 49, 52, 54
 - de la abuela, 37, 43, 49, 52, 54
 - manso, 33
 - primo, 36
 - salvaje, 33
 - totalmente asimétrico, 35
 - totalmente simétrico, 35
 - trébol, 35
 - trivial, 34
- Quandle, 44
 - de Alexander, 45
 - de conjugación, 44
 - diedral, 44
 - fundamental de un nudo, 45
 - trivial, 44
- Reidemeister
 - movimientos de, 34
 - teorema de, 34
- Reverso de un nudo, 35
- Schubert
 - teorema de, 37
- Teorema
 - de Dehn, 42
 - de Fox, 39
 - de Gordon–Luecke, 42
 - de Matveev, 46
 - de Reidemeister, 34
 - de Schubert, 37
 - de Wirtinger, 41
- Wirtinger
 - presentación de, 41
 - teorema de, 41