

Fundamentos de análisis y diseño de algoritmos

Árboles rojinegros

Árboles rojinegros

Propiedades de un árbol rojinegro

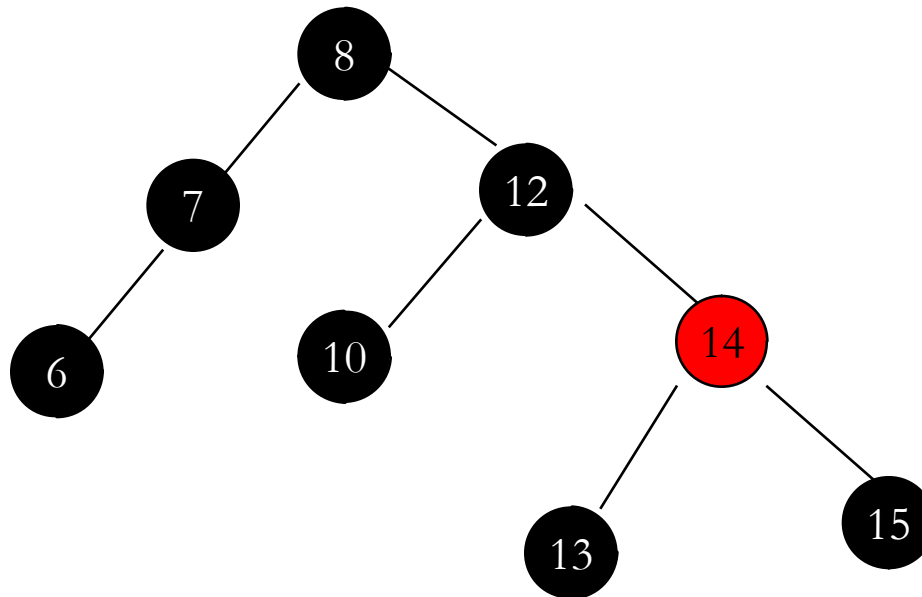
Rotaciones

Insertar borrar elementos de un árbol rojinegro

Árboles rojinegros

Árboles rojinegros

Un árbol rojinegro es un árbol de búsqueda binario en el que cada nodo tiene un bit extra para almacenar su color.

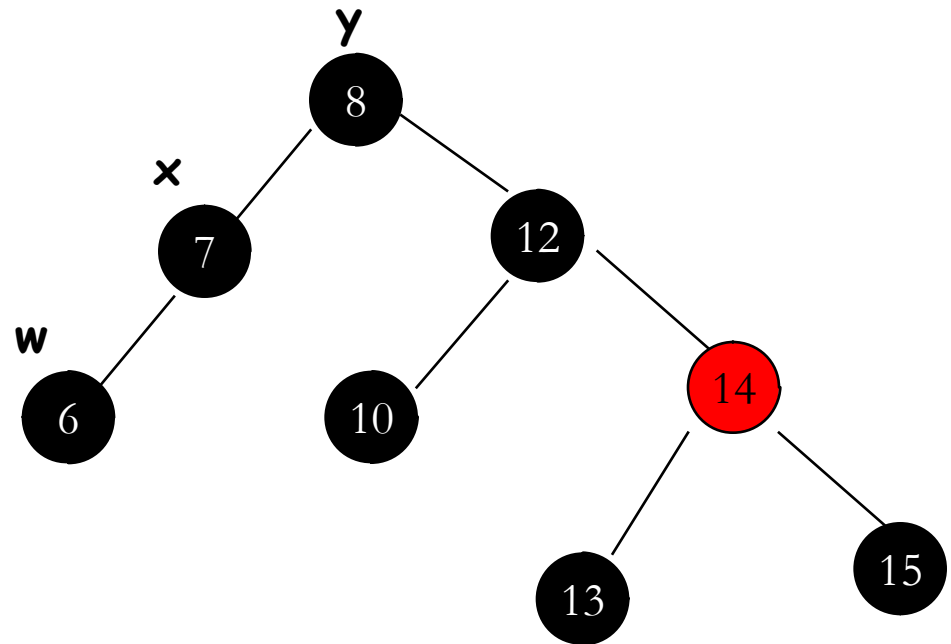


Árboles rojinegros

Árboles rojinegros

Un árbol rojinegro es un árbol de búsqueda binario en el que cada nodo tiene un campo extra para almacenar su color

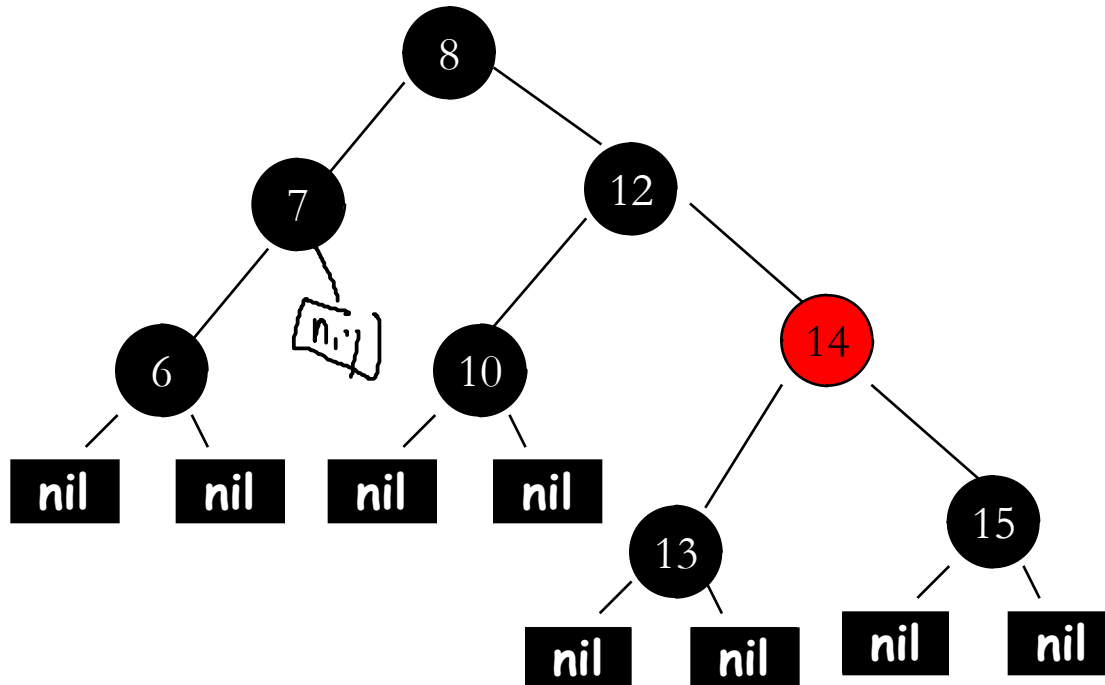
```
key[x]=7  
p[x]=y  
left[x]=w  
right[x]=nil  
color[x]=black
```



Árboles rojinegros

Árboles rojinegros

En los árboles rojinegros se colocan las referencias a nil como nodos de color negro



Árboles rojinegros

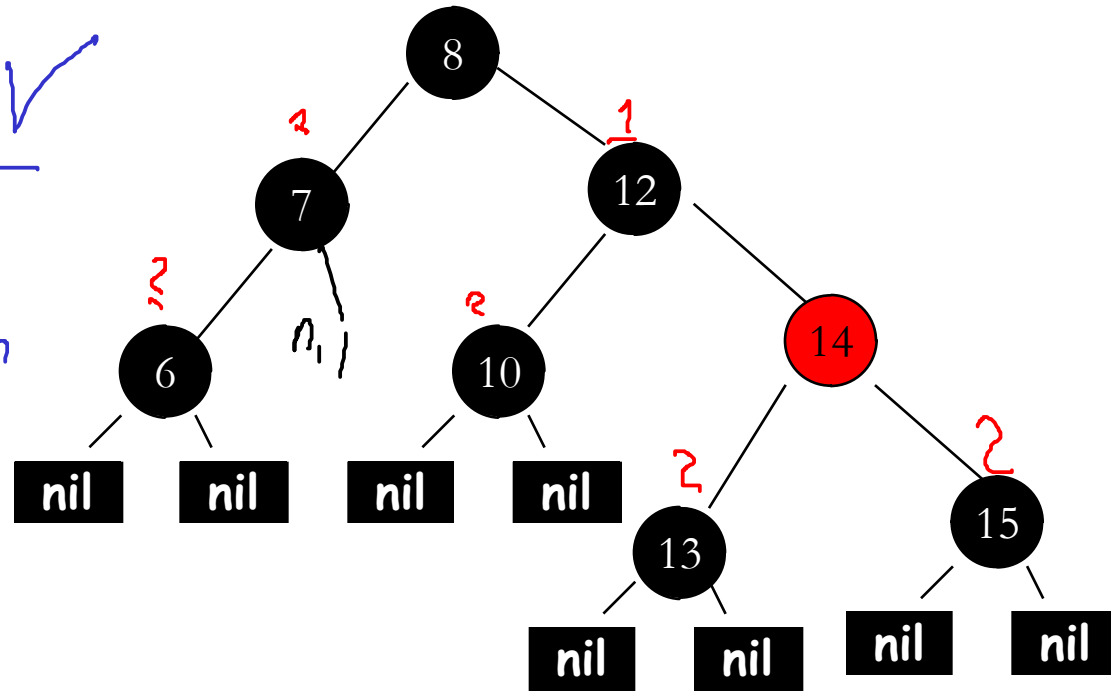
Propiedades de un árbol rojinegro

1. Todo nodo es rojo o negro
2. Toda hoja (nil) es negra
3. La raíz es negra
4. Si un nodo es rojo, entonces sus hijos son negros
5. Cada camino de un nodo a sus hojas descendientes contienen el mismo número de nodos negros

Árboles rojinegros

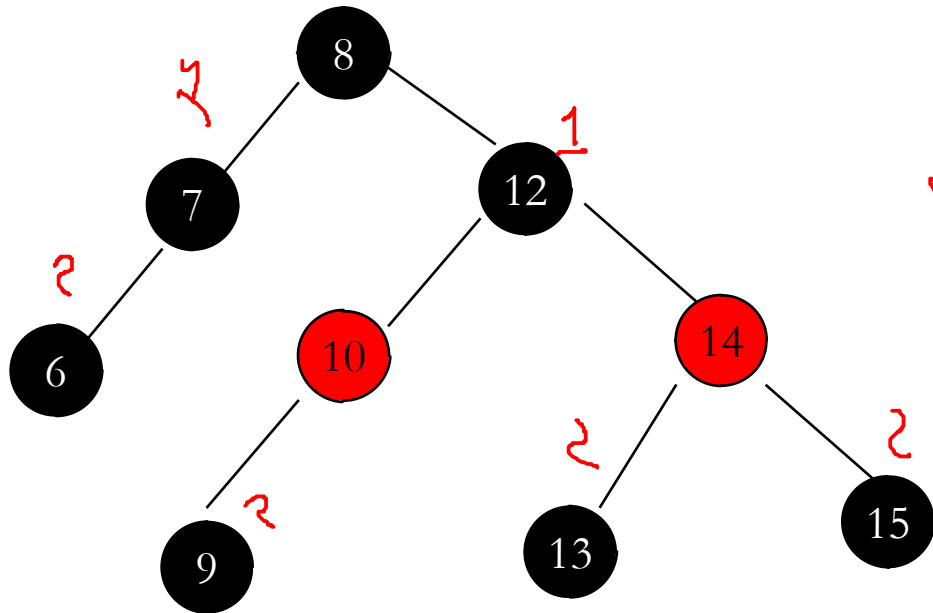
Propiedades de un árbol rojinegro

1. Todo nodo es rojo o negro ✓
2. Toda hoja (nil) es negra ✓
3. La raíz es negra ✓
4. Si un nodo es rojo, entonces sus hijos son negros ✓
5. Cada camino de un nodo a sus hojas descendientes contienen el mismo número de nodos negros



Árboles rojinegros

Indique si el siguiente árbol es rojinegro

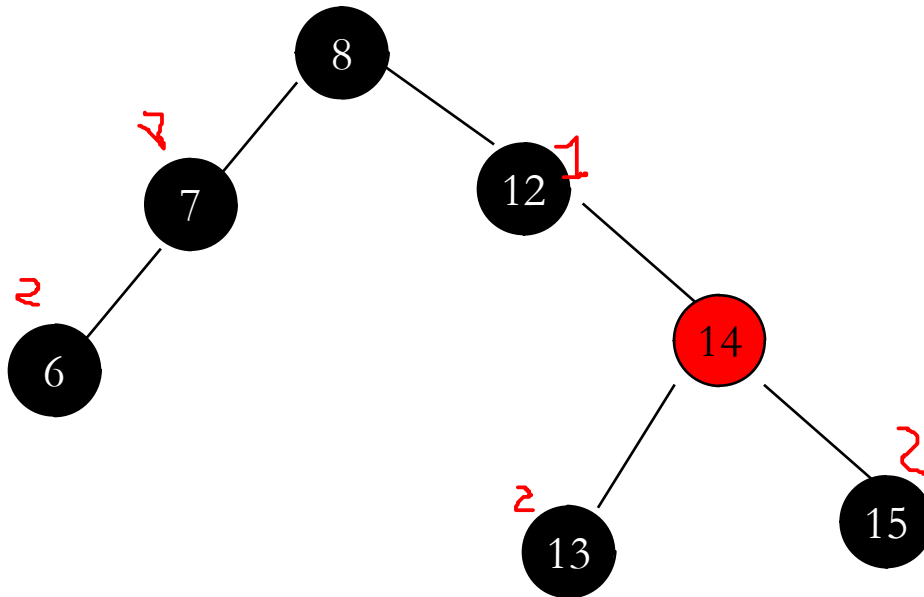


Propiedades de un árbol rojinegro

- 1, Todo nodo es rojo o negro
2. Toda hoja (nil) es negra
3. La raíz es negra
4. Si un nodo es rojo, entonces sus hijos son negros
5. Cada camino de un nodo a sus hojas descendientes contienen el mismo número de nodos negros

Árboles rojinegros

Indique si el siguiente árbol es rojinegro

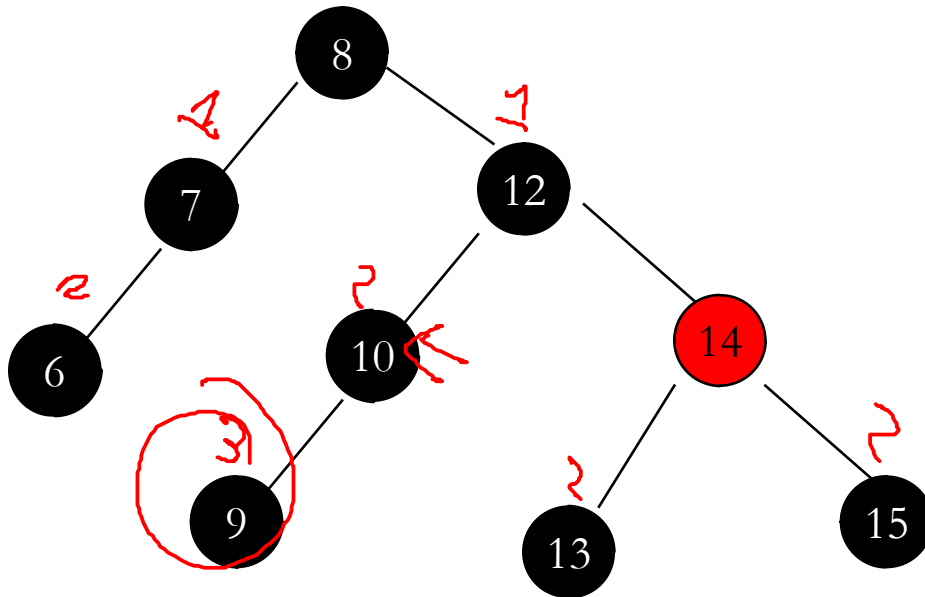


Propiedades de un árbol rojinegro

1. Todo nodo es rojo o negro
2. Toda hoja (nil) es negra
3. La raíz es negra
4. Si un nodo es rojo, entonces sus hijos son negros
5. Cada camino de un nodo a sus hojas descendientes contienen el mismo número de nodos negros

Árboles rojinegros

Indique si el siguiente árbol es rojinegro



Propiedades de un árbol rojinegro

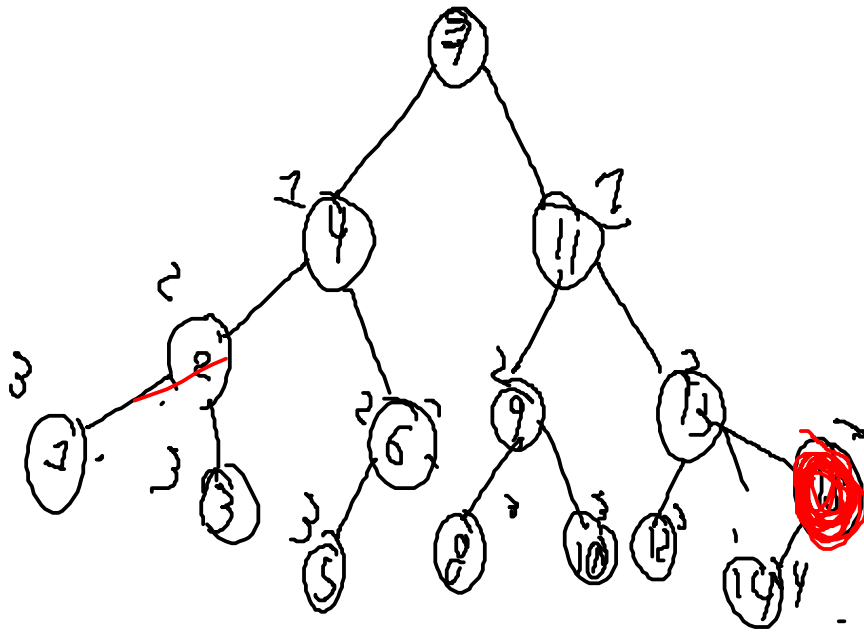
1. Todo nodo es rojo o negro
2. Toda hoja (nil) es negra
3. La raíz es negra
4. Si un nodo es rojo, entonces sus hijos son negros
5. Cada camino de un nodo a sus hojas descendientes contienen el mismo número de nodos negros

Árboles rojinegros

- Dibuje el árbol rojinegro completo de altura 3, dadas las llaves $\{1, 2, \dots, 15\}$

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15

- Suponga que la raíz de un árbol rojinegro es de color rojo, Si se cambia a color negro, el árbol será rojinegro?

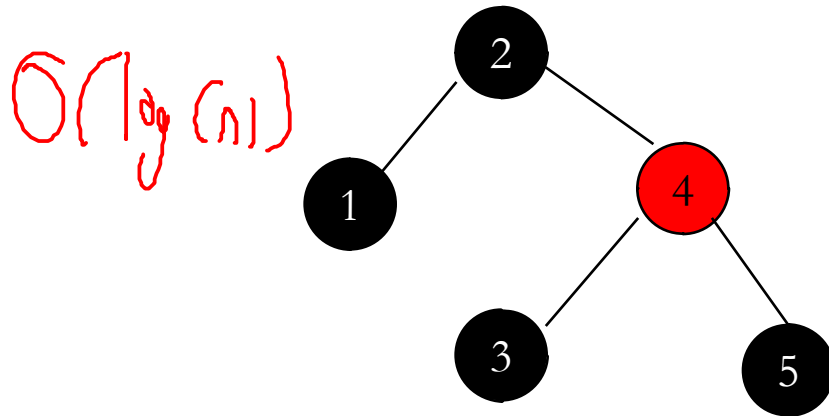


Árboles rojinegros

Black-height (bh)

La altura negra de un nodo x , $bh(x)$, es el número de nodos negros en cualquier camino desde el nodo x (no incluido) hasta una hoja

Una árbol rojinegro con n nodos internos tiene altura, a lo más, de $2\lg(n+1)$



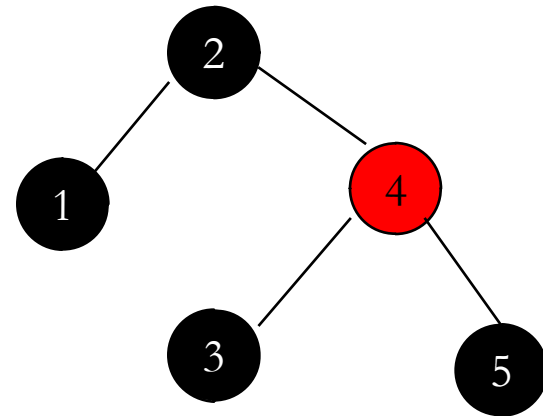
Árboles rojinegros

Black-height (bh)

La altura negra de un nodo x , $bh(x)$, es el número de nodos negros en cualquier camino desde el nodo x (no incluido) hasta una hoja

Una árbol rojinegro con n nodos internos tiene altura, a lo más, de $2\lg(n+1)$

Las operaciones SEARCH, MINIMUM, MAXIMUM, SUCCESSOR, INSERT Y DELETE se pueden realizar en tiempo $O(h)$, esto es, en el caso de árboles rojinegros, $O(\lg n)$



Árboles rojinegros

Acerca de INSERT y DELETE

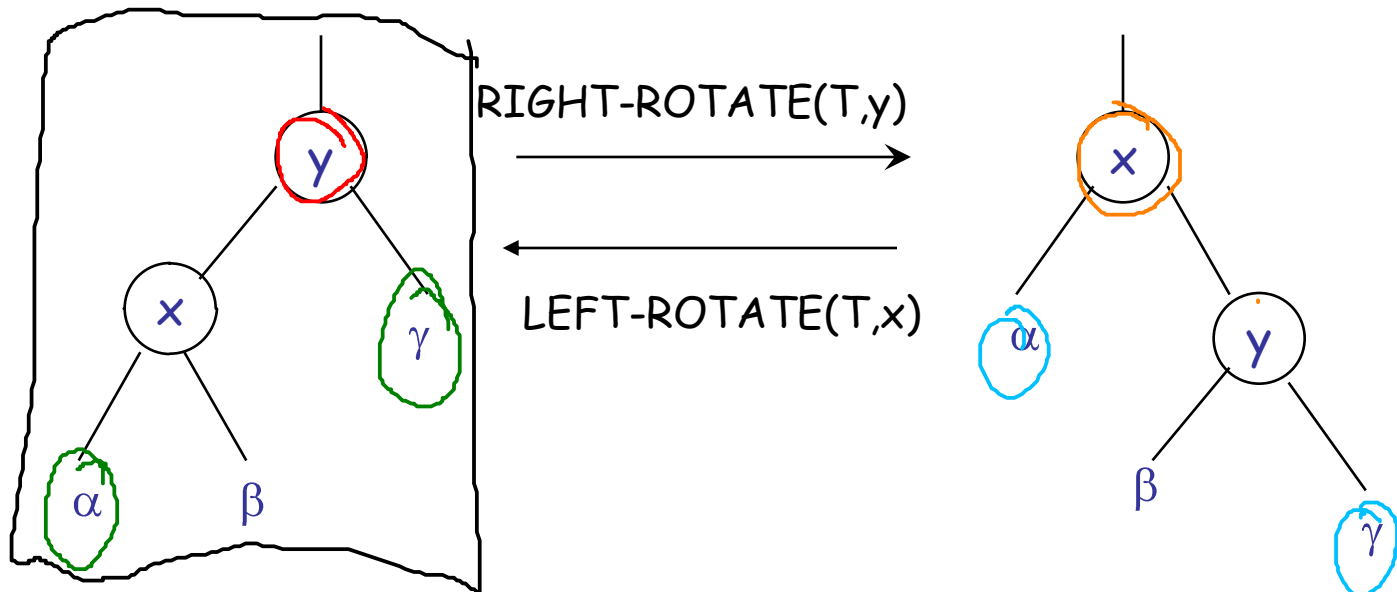
Si se utilizan los procedimientos definidos para los árboles de búsqueda binario se podría violar alguna de las reglas de los árboles rojinegros

Es necesario definir una operación adicional para rotar los nodos

Árboles rojinegros

Rotaciones

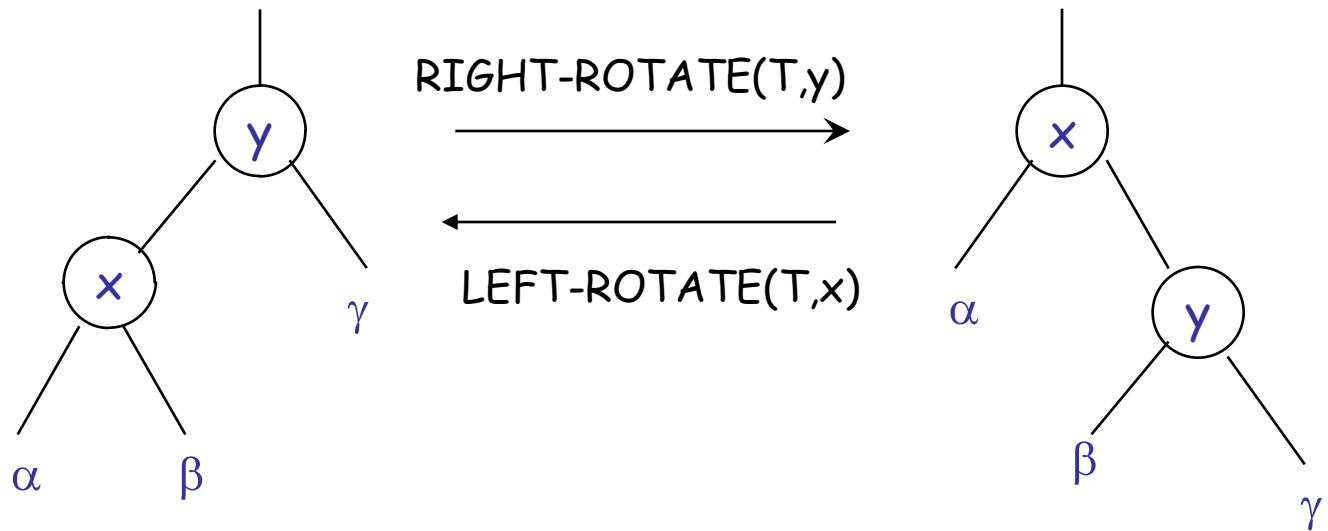
Existen dos procedimientos, uno para rotar a la izquierda y otro a la derecha



Árboles rojinegros

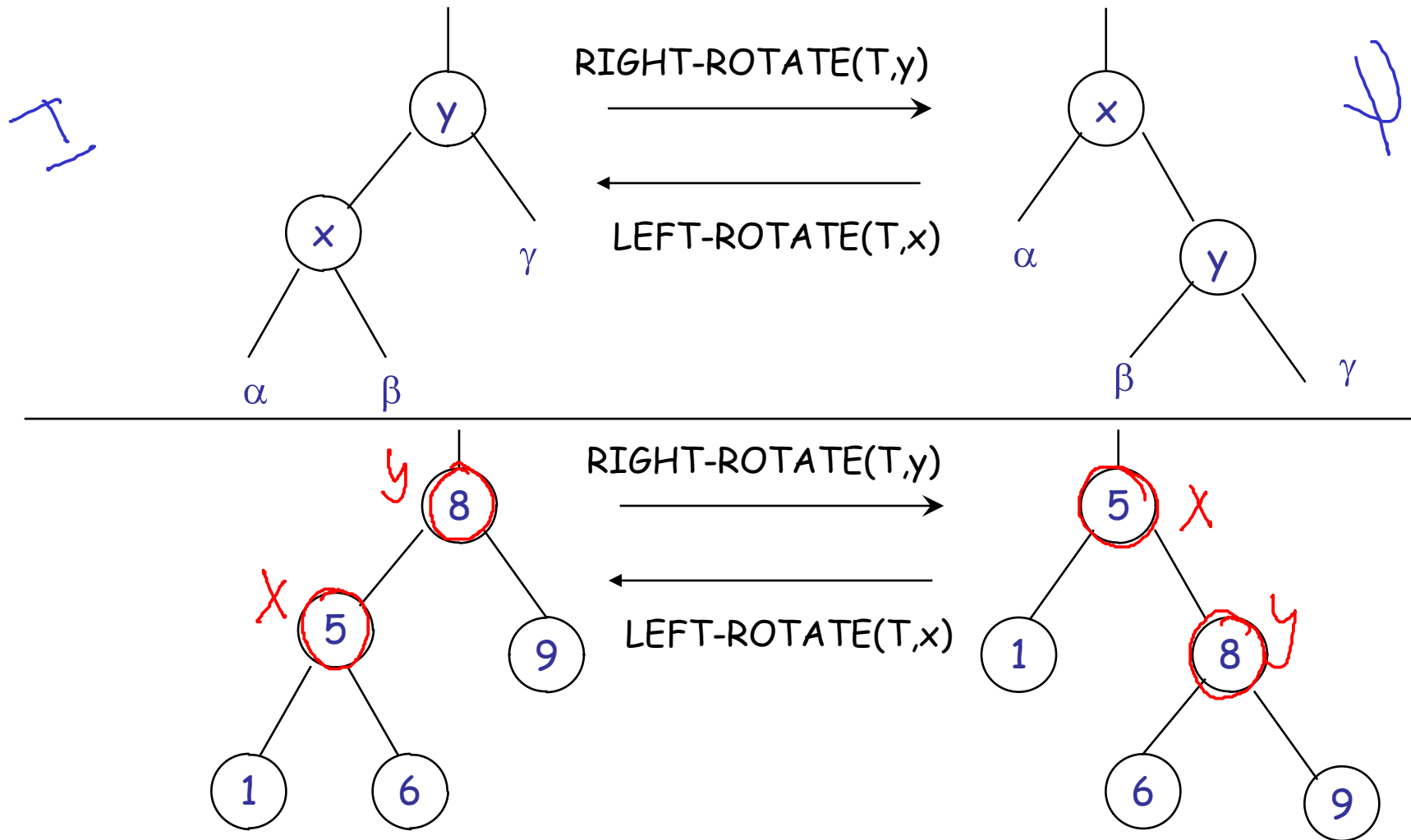
Rotaciones

Existen dos procedimientos, uno para rotar a la izquierda y otro a la derecha



Con la rotación se preserva el orden del árbol de búsqueda binaria

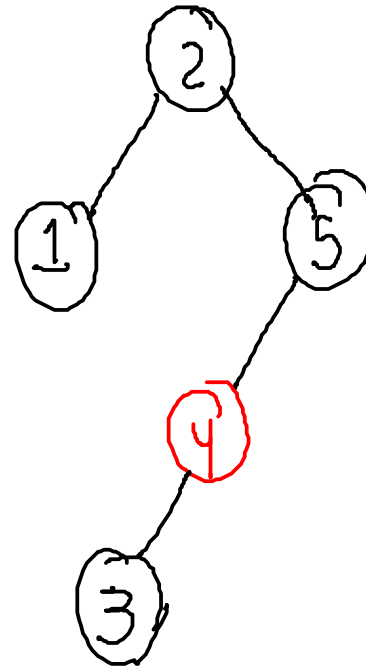
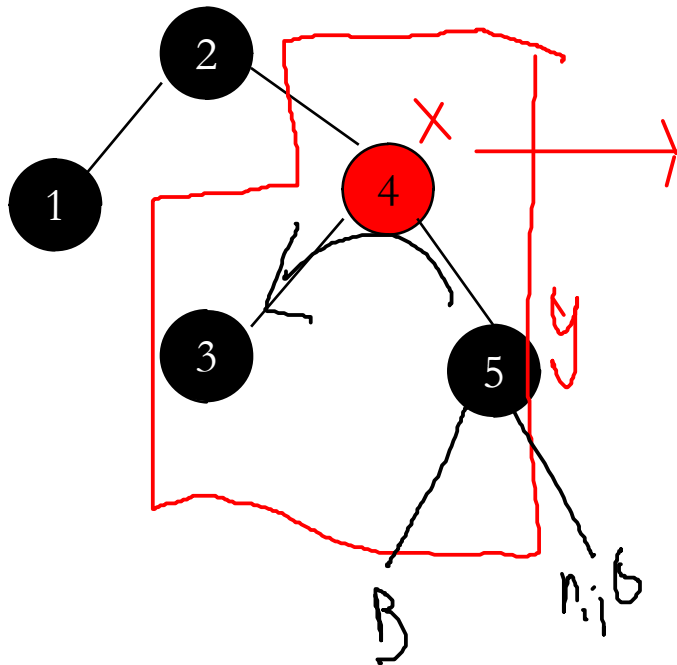
Árboles rojinegros



Con la rotación se preserva el orden del árbol de búsqueda binaria

Árboles rojinegros

Indique el resultado de $\text{LEFT-ROTATE}(T, 4)$



Árboles rojinegros

LEFT-ROTATE(T, x)

$y \leftarrow \text{right}[x]$

$\text{right}[x] \leftarrow \text{left}[y]$

$p[\text{left}[y]] \leftarrow x$

$p[y] \leftarrow p[x]$

if $p[x] = \text{nil}$

 then $\text{root}[T] \leftarrow y$

 else if $x = \text{left}[p[x]]$

 then $\text{left}[p[x]] \leftarrow y$

 else $\text{right}[p[x]] \leftarrow y$

$\text{left}[y] \leftarrow x$

$p[x] \leftarrow y$

Se asume que $\text{right}[x] \neq \text{nil}$

Árboles rojinegros

LEFT-ROTATE(T, x)

$y \leftarrow \text{right}[x]$

$\text{right}[x] \leftarrow \text{left}[y]$

$p[\text{left}[y]] \leftarrow x$

$p[y] \leftarrow p[x]$

if $p[x] = \text{nil}$

 then $\text{root}[T] \leftarrow y$

 else if $x = \text{left}[p[x]]$

 then $\text{left}[p[x]] \leftarrow y$

 else $\text{right}[p[x]] \leftarrow y$

$\text{left}[y] \leftarrow x$

$p[x] \leftarrow y$

¿Cuál es la complejidad del algoritmo?

$O(1)$

Árboles rojinegros

LEFT-ROTATE(T, x)

$y \leftarrow \text{right}[x]$

$\text{right}[x] \leftarrow \text{left}[y]$

$p[\text{left}[y]] \leftarrow x$

$p[y] \leftarrow p[x]$

if $p[x] = \text{nil}$

then $\text{root}[T] \leftarrow y$

else if $x = \text{left}[p[x]]$

then $\text{left}[p[x]] \leftarrow y$

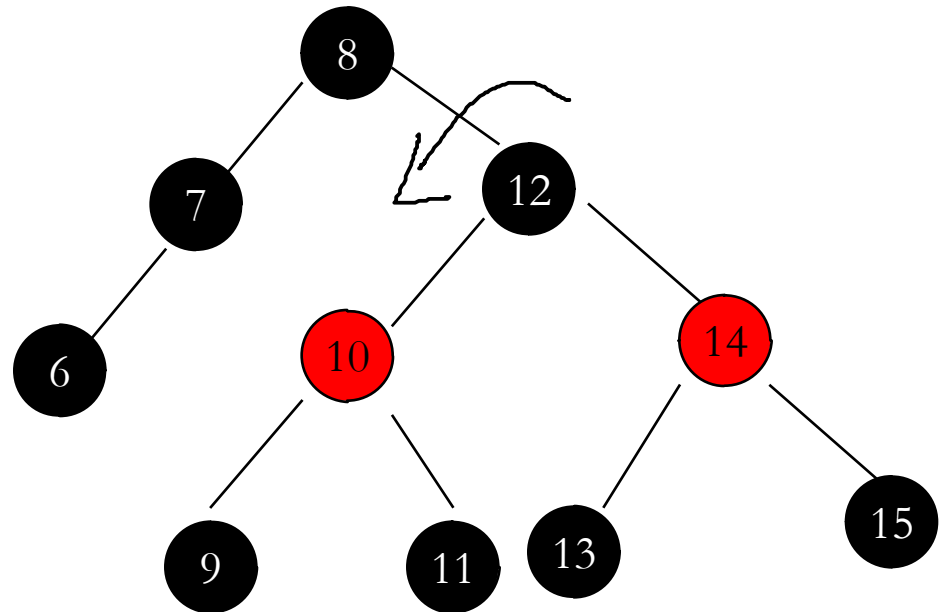
else $\text{right}[p[x]] \leftarrow y$

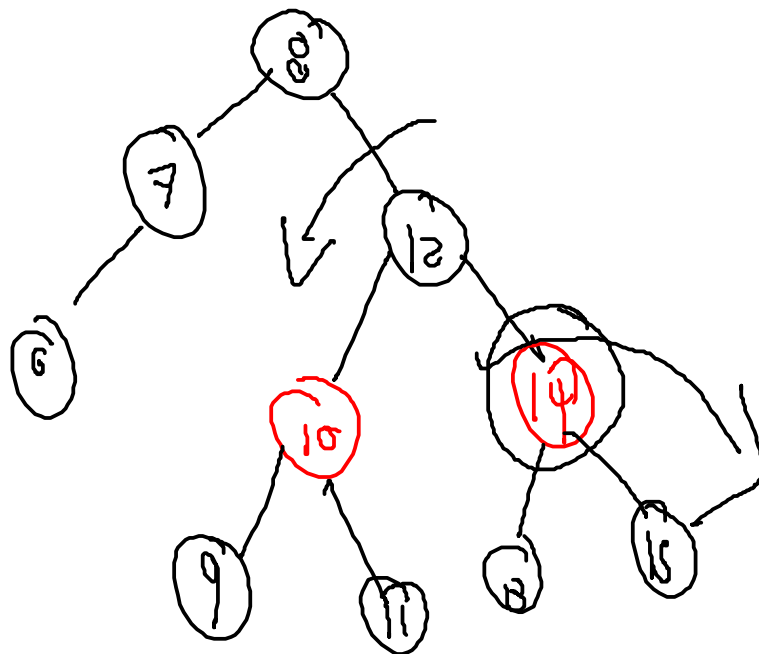
$\text{left}[y] \leftarrow x$

$p[x] \leftarrow y$

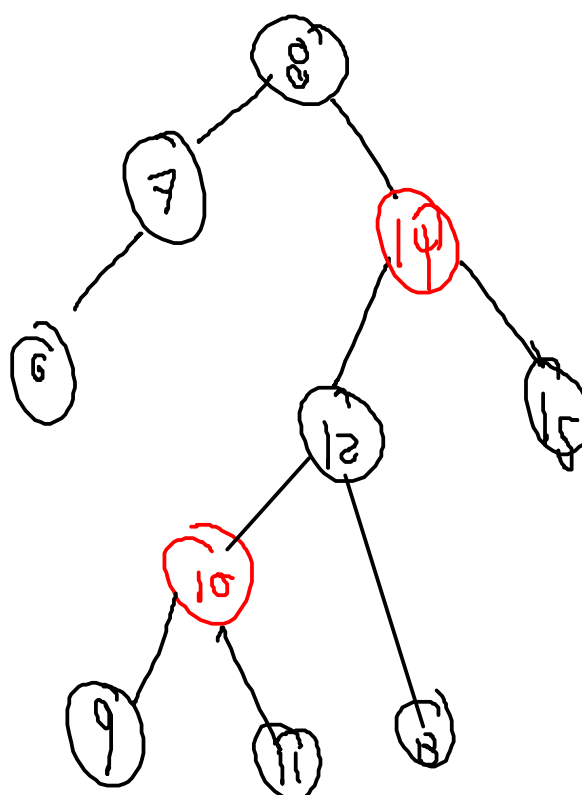
Siga el algoritmo

LEFT-ROTATE($T, 12$)

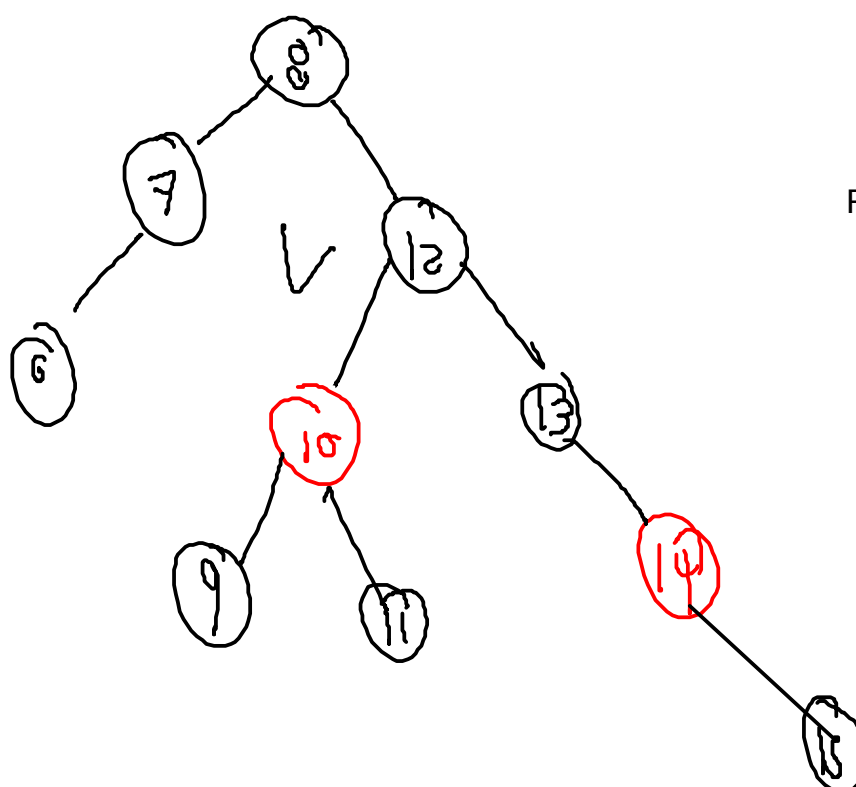




LEFT-ROTATE(12)



RIGHT-ROTATE(14)

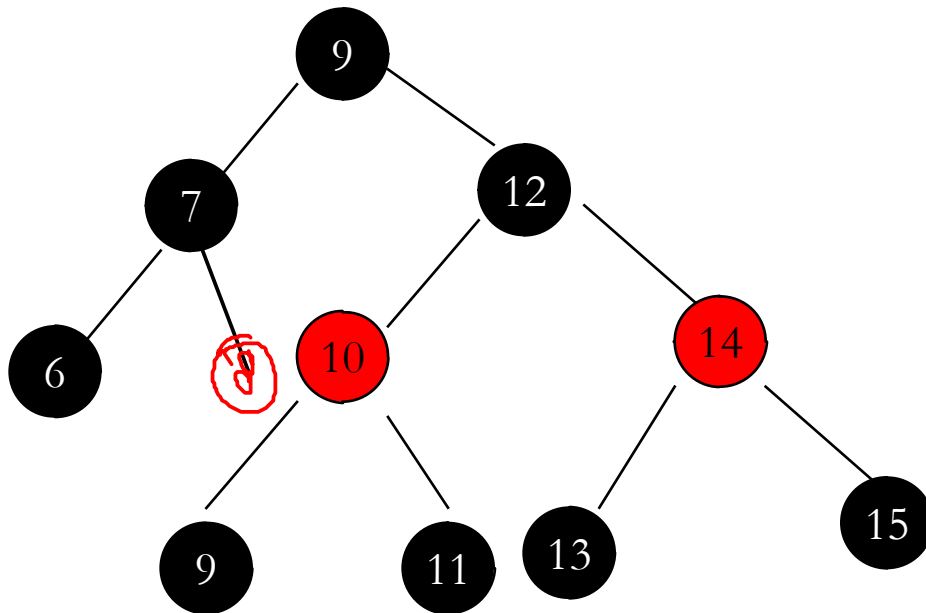


Árboles rojinegros

Insertar un nodo en el árbol

Se usa el procedimiento TREE-INSERT y se colorea x de rojo

Luego se modifica el árbol recoloreando nodos y haciendo rotaciones



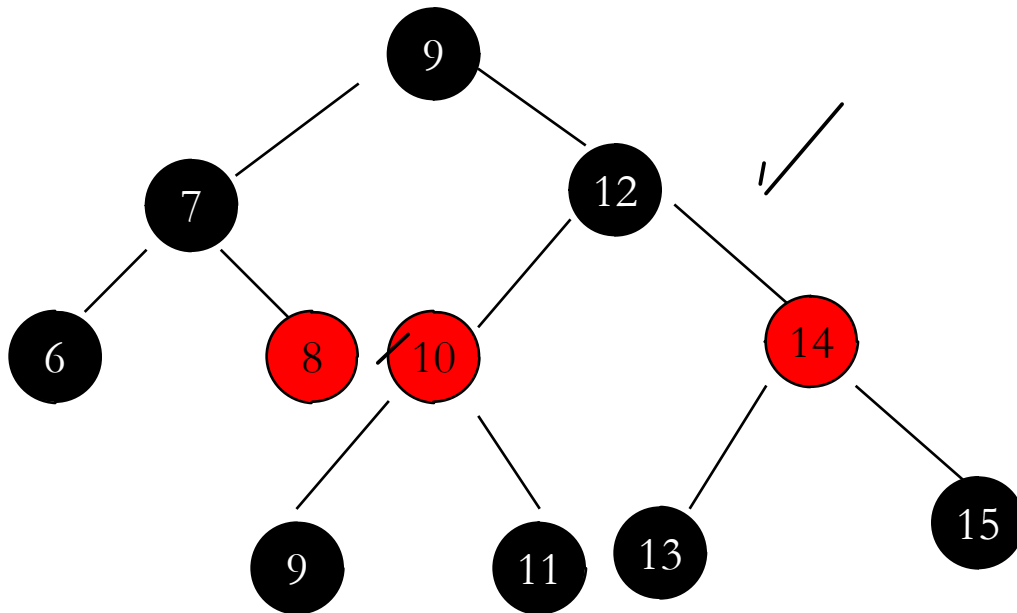
Qué pasa si se inserta el
nodo con llave 8

Árboles rojinegros

Insertar un nodo en el árbol

Se usa el procedimiento TREE-INSERT y se colorea x de rojo

Luego se modifica el árbol recoloreando nodos y haciendo rotaciones



Qué pasa si se inserta el
nodo con llave 8

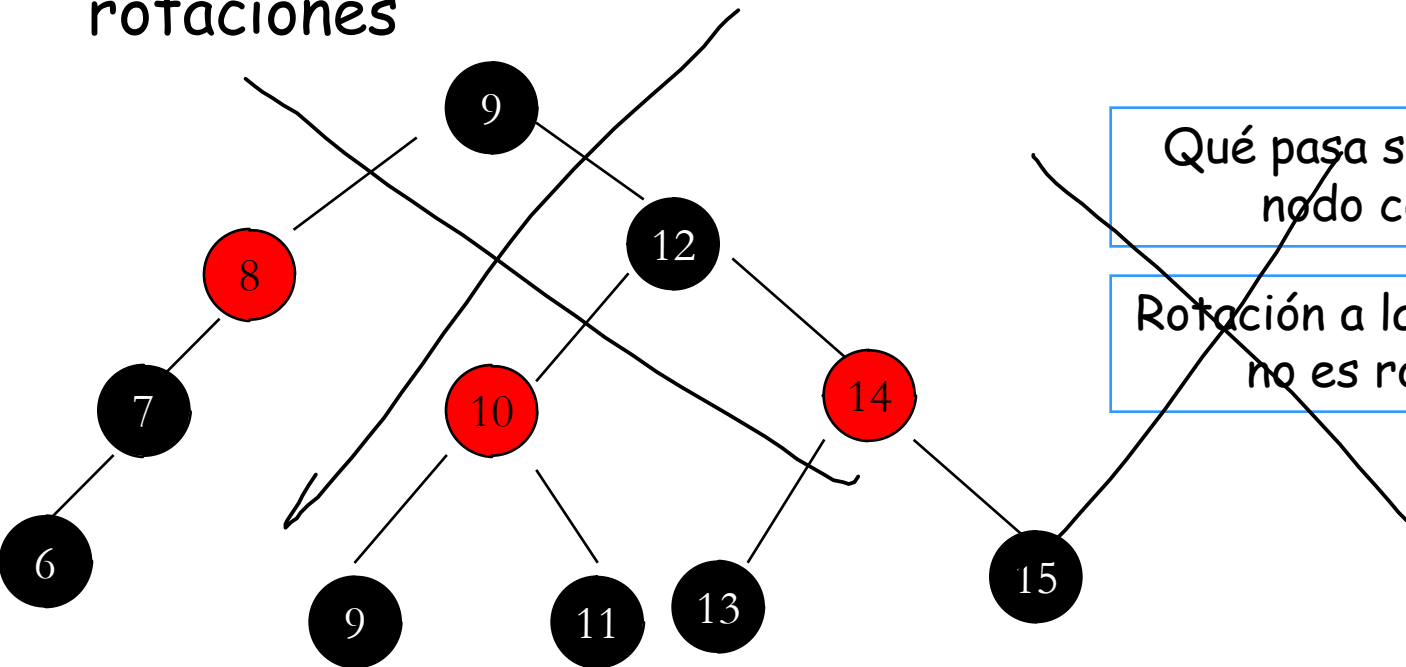
~~8 no puede ser rojo porque
no tienes hijos negros~~

Árboles rojinegros

Insertar un nodo en el árbol

Se usa el procedimiento TREE-INSERT y se colorea x de rojo

Luego se modifica el árbol recoloreando nodos y haciendo rotaciones



Qué pasa si se inserta el
nodo con llave 8

Rotación a la izquierda, aun
no es rojinegro ...

RB-INSERT(T, x)

TREE-INSERT(T,x)

color[z]←RED

while $x \neq \text{root}[T]$ and $\text{color}[p[x]] = \text{RED}$

do if $p[x] = \text{left}[p[p[x]]]$

then $y \leftarrow \text{right}[p[p[z]]]$

if $\text{color}[y] = \text{RED}$

then $\text{color}[p[x]] \leftarrow \text{BLACK}$ #Caso1

color[y]←BLACK #Caso1

color[p[p[x]]]←RED #Caso1

$x \leftarrow p[p[x]]$ #Caso1

else if $x = \text{right}[p[x]]$

then $x \leftarrow p[x]$ #Caso2

LEFT-ROTATE(T,x) #Caso2

color[p[x]]←BLACK #Caso3

color[p[p[x]]]←RED #Caso3

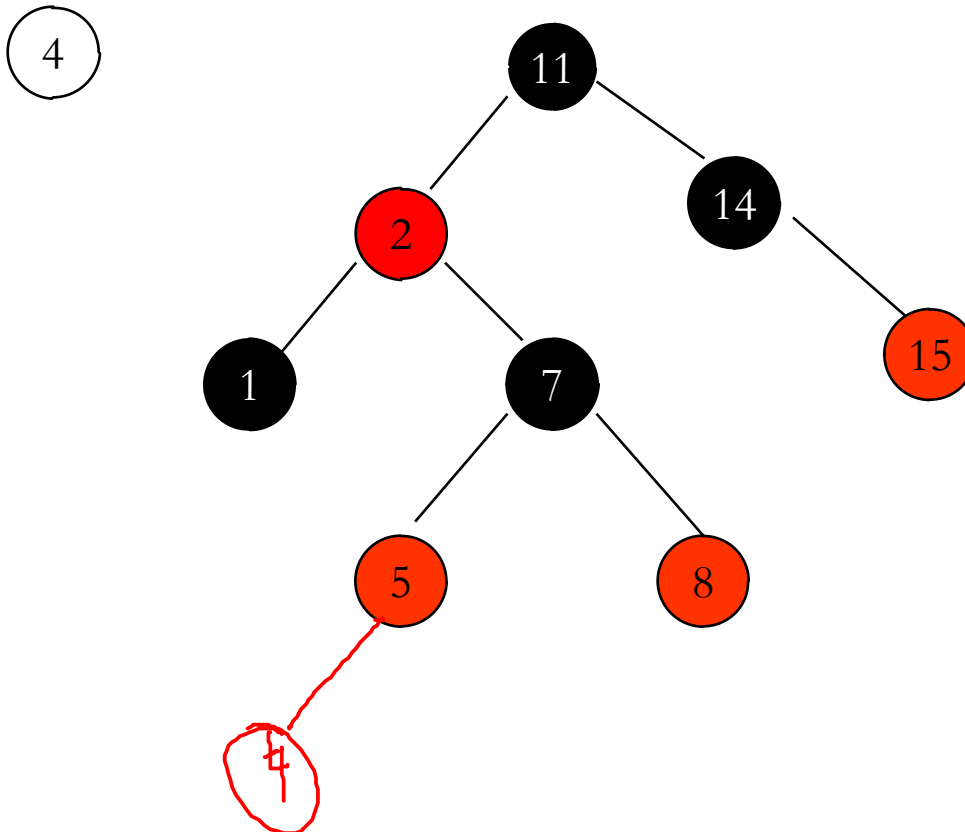
RIGHT-ROTATE(T,p[p[x]]) #Caso3

else procedimiento simétrico cambiando "right" por "left"

color[root[T]]←BLACK

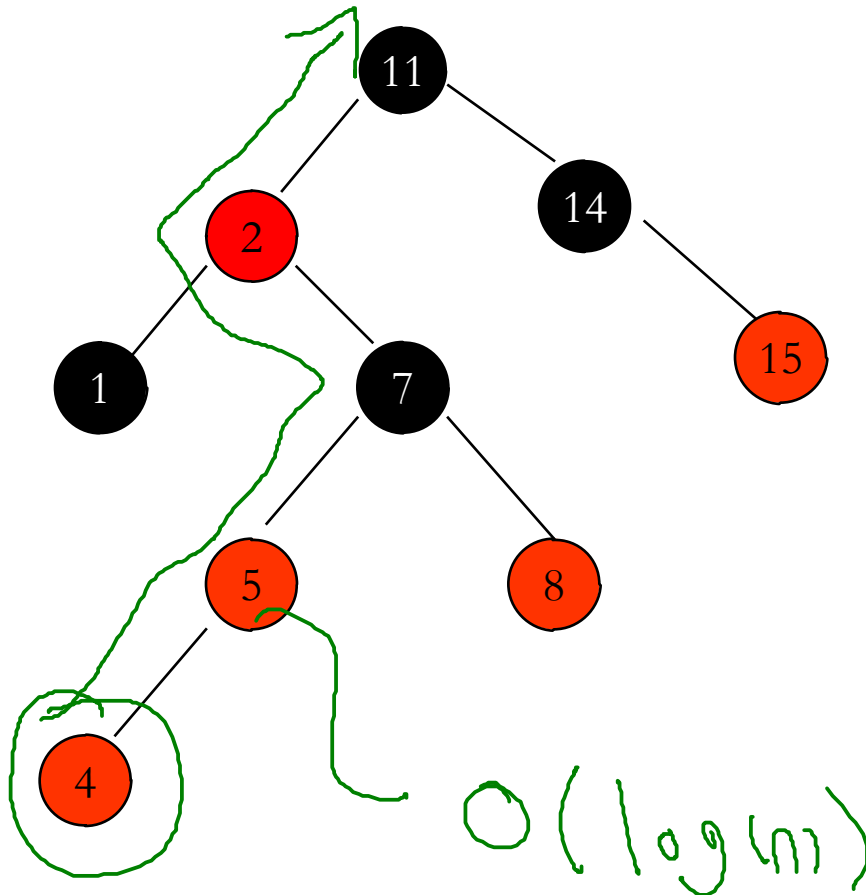
Árboles rojinegros

Dado el árbol T , se desea insertar x , $\text{key}[x]=4$



Árboles rojinegros

Dado el árbol T, se desea insertar x, $\text{key}[x]=4$



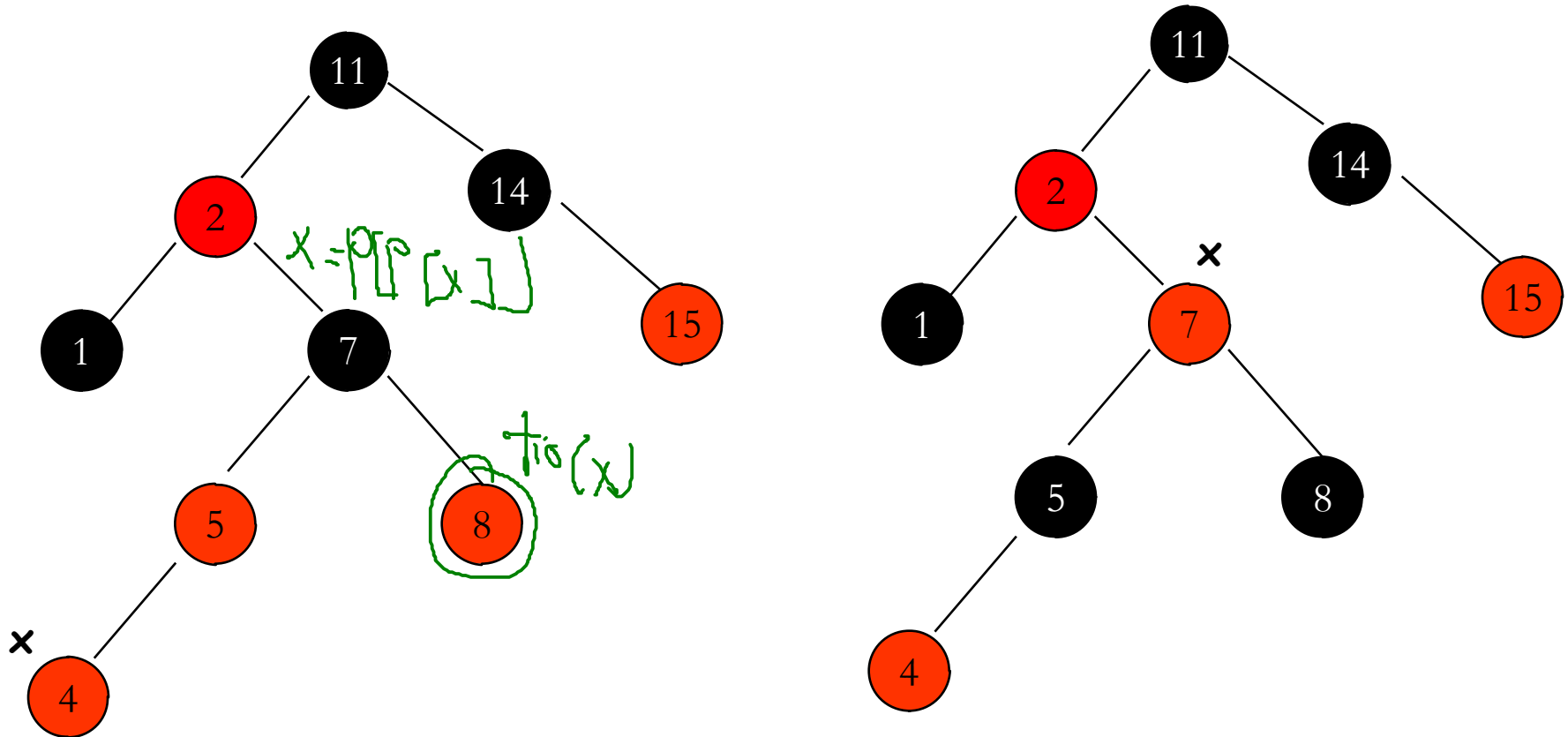
Se inserta y se colorea de rojo

El árbol resultante no es rojinegro

$$\rightarrow 2 \lg n + 1 \\ = O(\log(n))$$

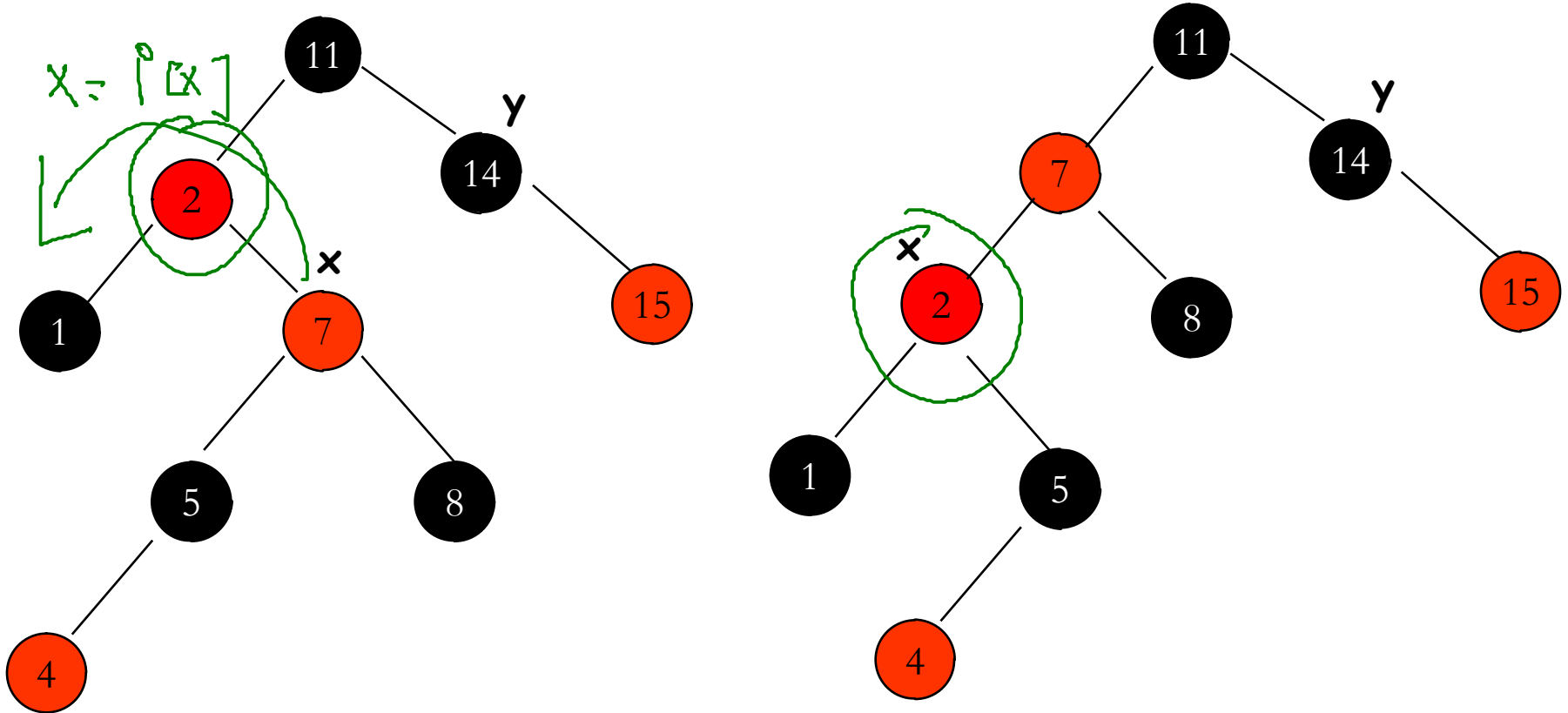
Árboles rojinegros

Caso 1: El tío de x es rojo, se pintan de negro padre y tío de x , el abuelo de x queda entonces de rojo



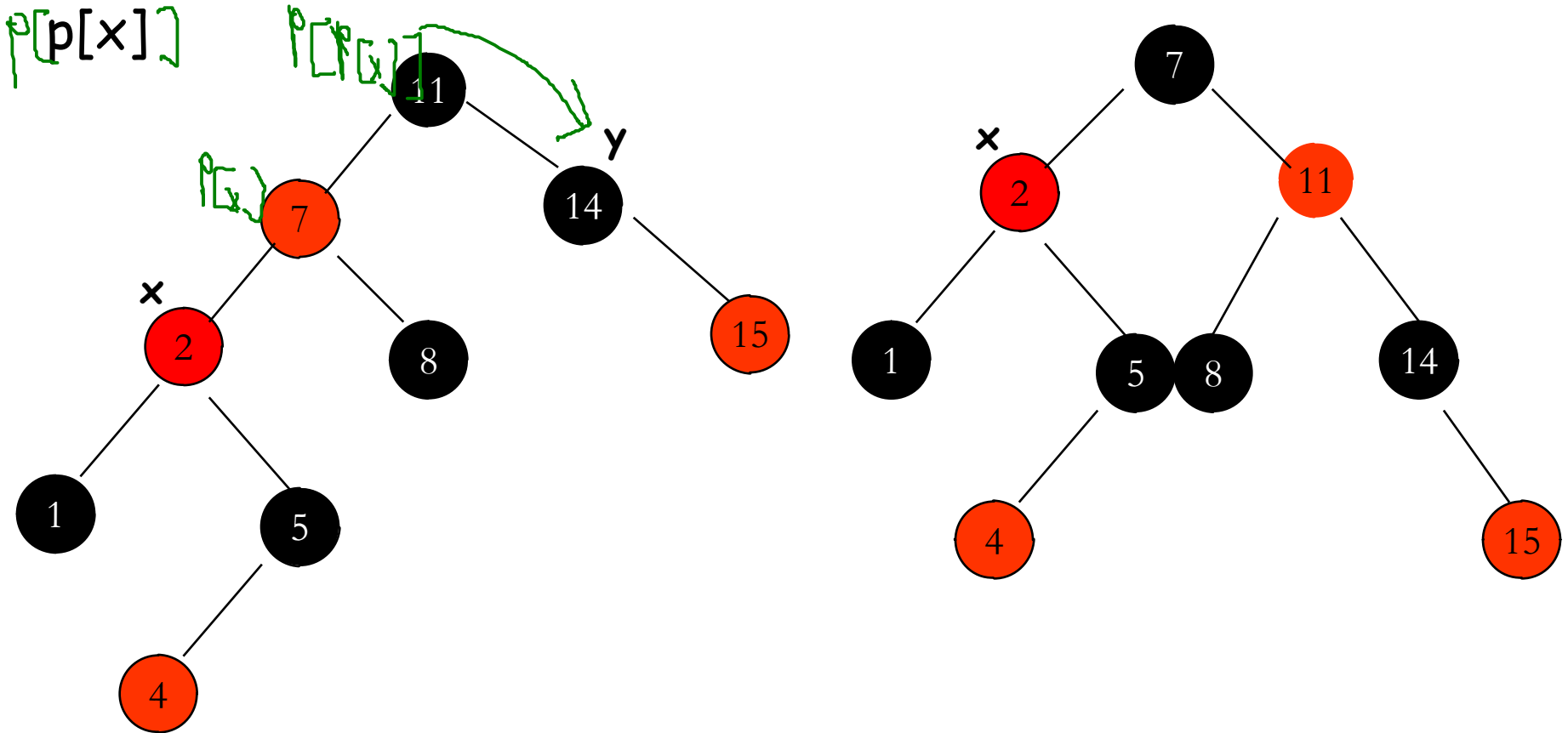
Árboles rojinegros

Caso 2: El tío de x , y , es ahora negro. Se rota a la izquierda $p[x]$



Árboles rojinegros

Caso 3: x (rojo) es el hijo izquierdo de un padre rojo. Se cambian los colores de $p[x]$ y $p[p[x]]$. Se rota a la derecha



RB-INSERT(T, x)

TREE-INSERT(T,x)

color[z]←RED

while $x \neq \text{root}[T]$ and $\text{color}[p[x]] = \text{RED}$

do if $p[x] = \text{left}[p[p[x]]]$

then $y \leftarrow \text{right}[p[p[z]]]$

if $\text{color}[y] = \text{RED}$

then $\text{color}[p[x]] \leftarrow \text{BLACK}$

#Caso1

color[y]←BLACK

#Caso1

color[p[p[x]]]←RED

#Caso1

$x \leftarrow p[p[x]]$

#Caso1

else if $x = \text{right}[p[x]]$

then $x \leftarrow p[x]$

#Caso2

LEFT-ROTATE(T,x)

#Caso2

color[p[x]]←BLACK

#Caso3

color[p[p[x]]]←RED

#Caso3

RIGHT-ROTATE(T, $p[p[x]]$)

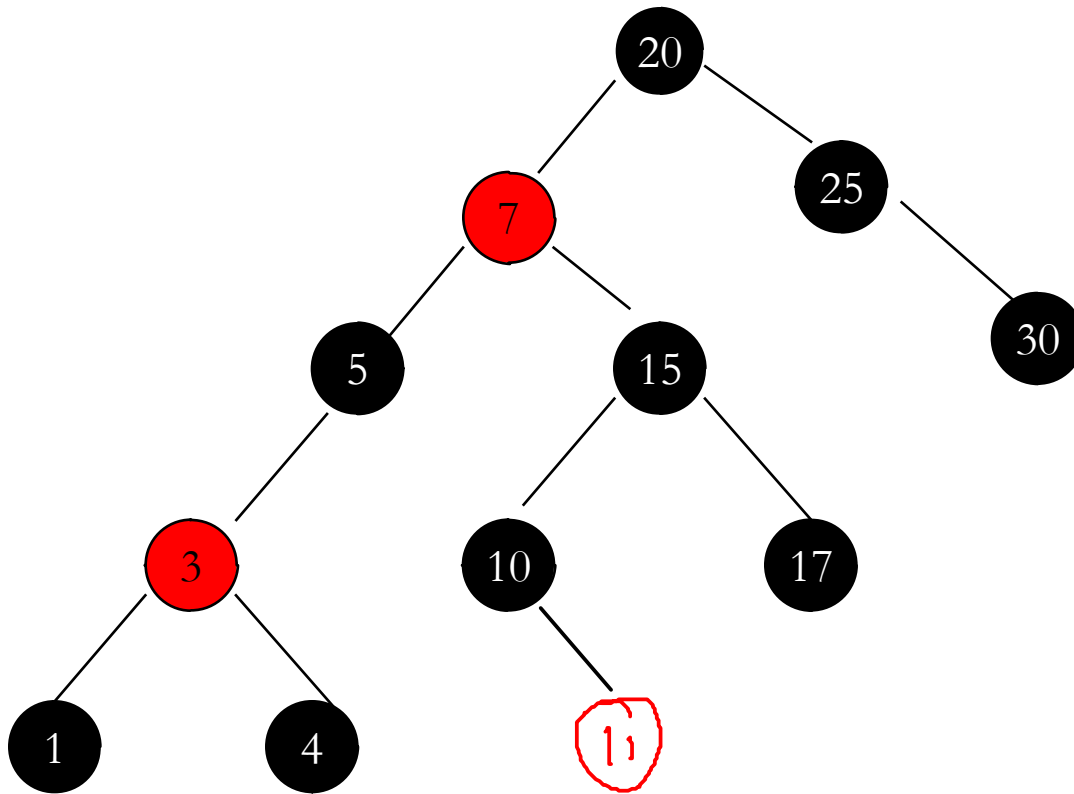
#Caso3

else procedimiento simétrico cambiando "right" por "left"

color[root[T]]←BLACK

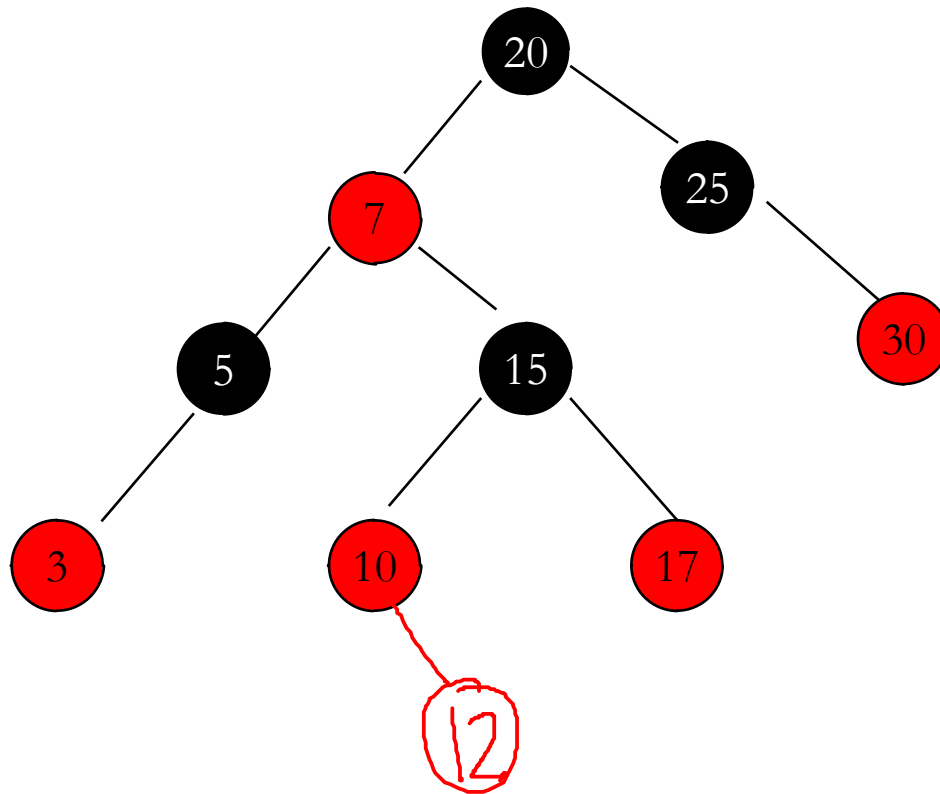
Árboles rojinegros

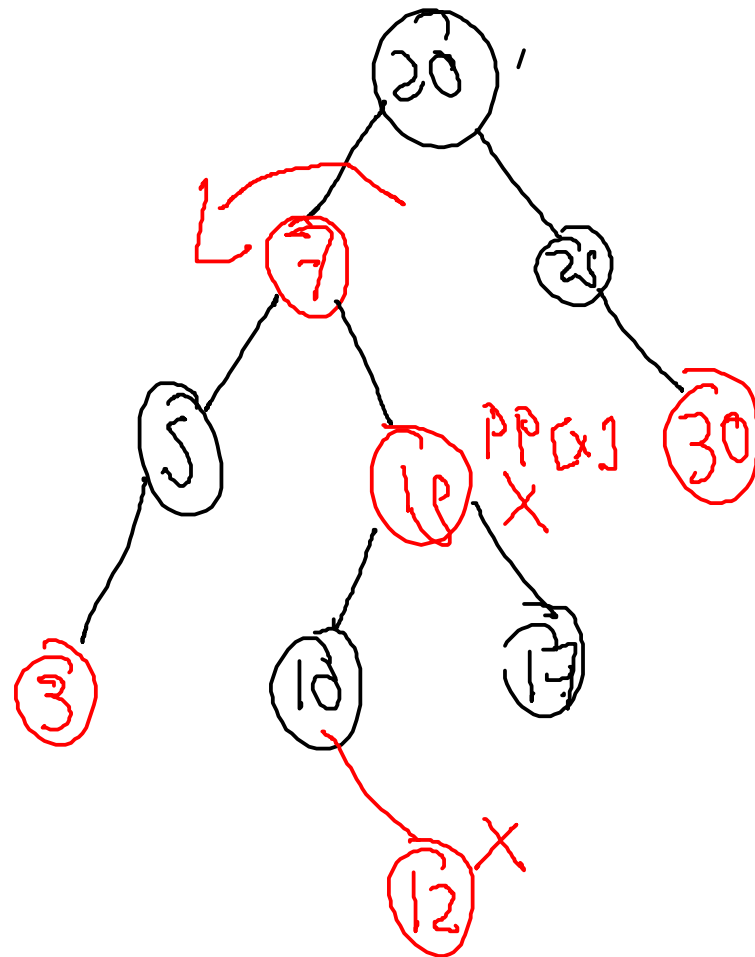
Siga el algoritmo RB-INSERT(T, x), donde $\text{key}[x]=11$

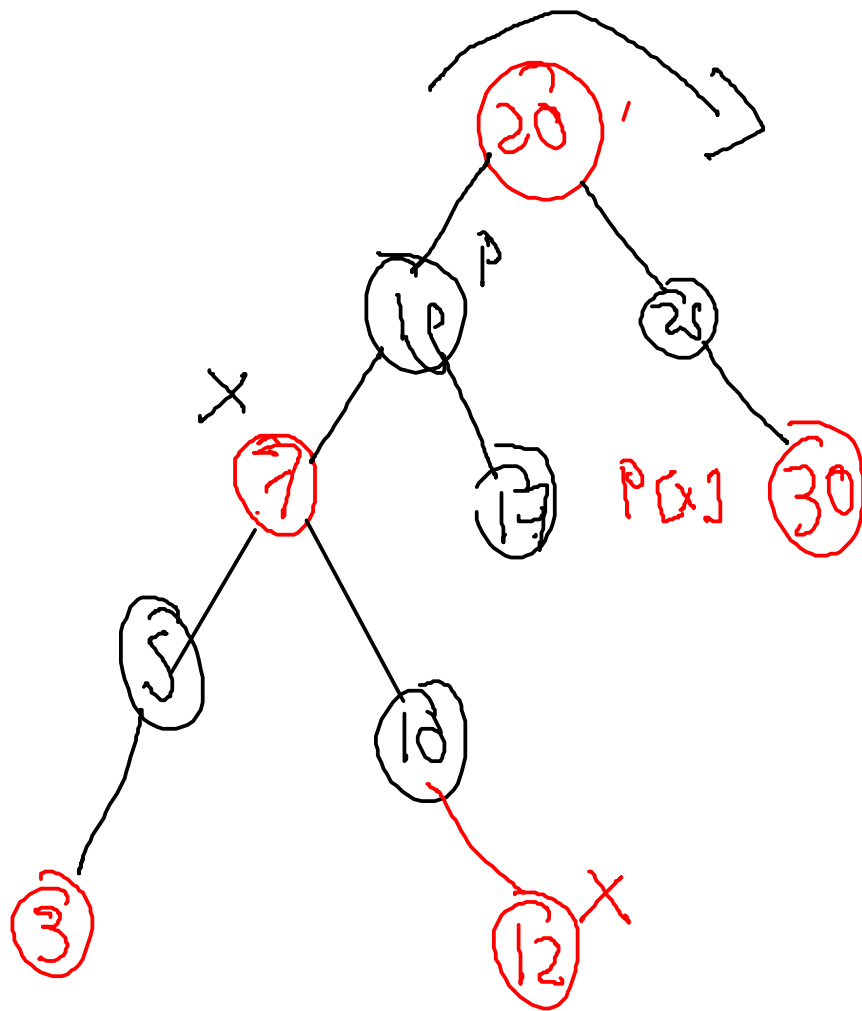


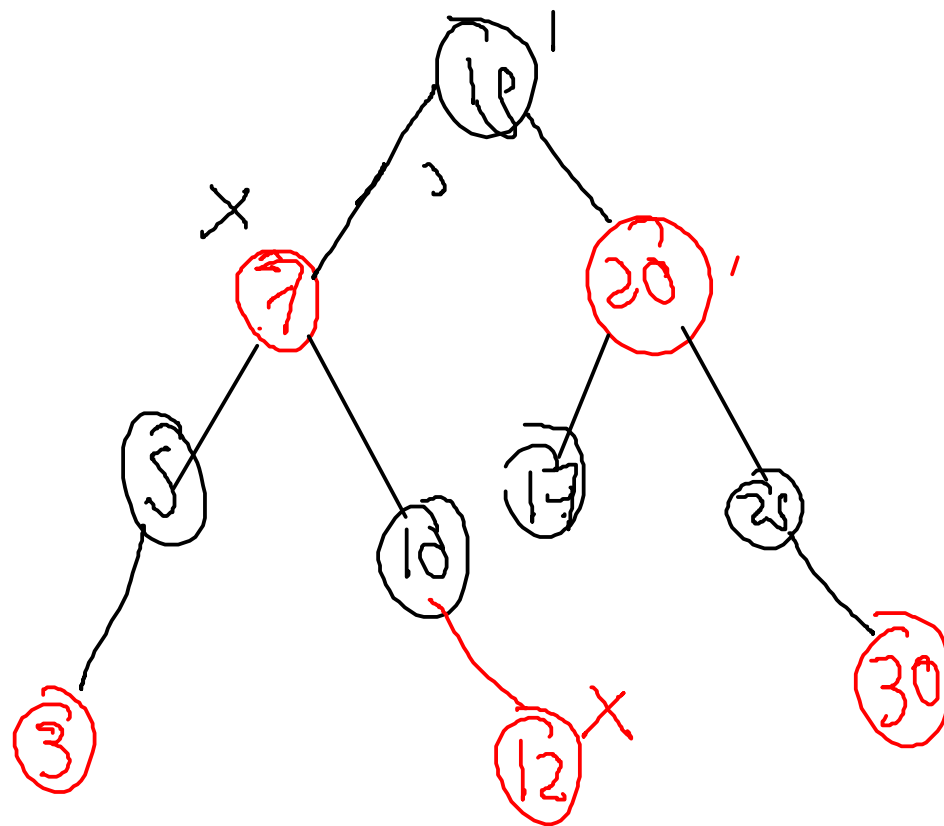
Árboles rojinegros

Siga el algoritmo RB-INSERT(T, x), $\text{key}[x]=12$









Árboles rojinegros

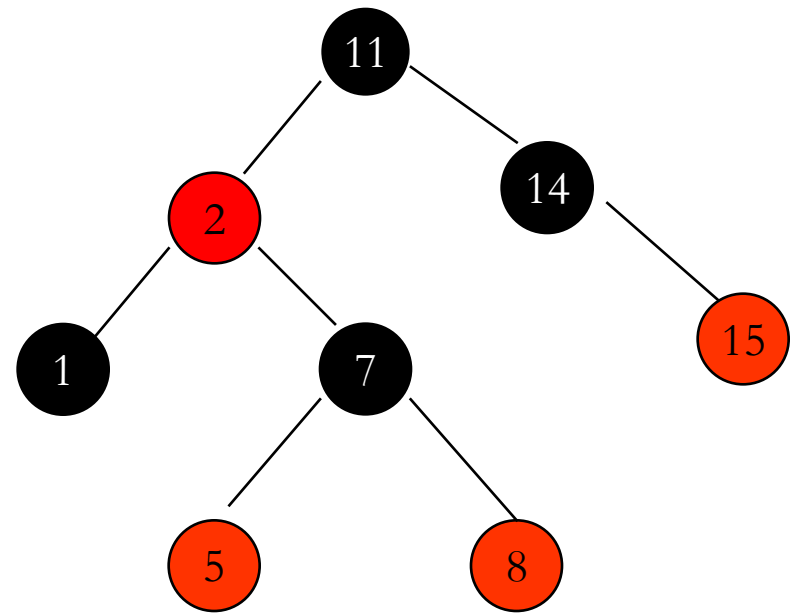
Eliminación

Es una modificación de TREE-DELETE:

- Todas las referencias a nil se reemplazan por un nodo centinela nil[T]. De esta forma, un nodo nil tiene un puntero a su padre
- Se debe hacer un llamado al procedimiento TREE-DELETE-FIXUP para cumplir con las condiciones de los árboles rojinegros

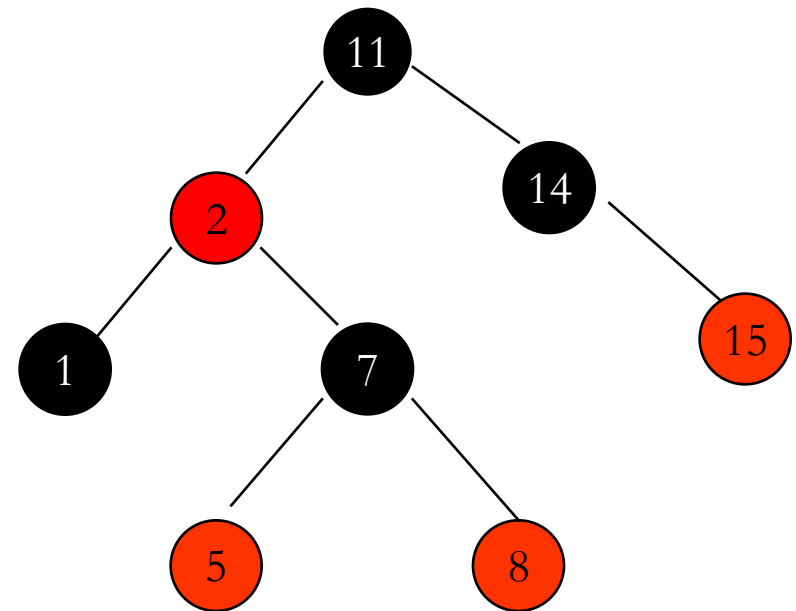
RB-DELETE(T, z)

```
if left[z]=nil or right[z]=nil[T]
    then  $y \leftarrow z$ 
    else  $y \leftarrow \text{TREE-SUCCESSOR}(z)$ 
if left[y]  $\neq$  nil[T]
    then  $x \leftarrow \text{left}[y]$ 
    else  $x \leftarrow \text{right}[y]$ 
 $p[x] \leftarrow p[y]$ 
if  $p[y] = \text{nil}[T]$ 
    then  $\text{root}[T] \leftarrow x$ 
    else if  $y = \text{left}[p[y]]$ 
        then  $\text{left}[p[y]] \leftarrow x$ 
        else  $\text{right}[p[y]] \leftarrow x$ 
if  $y \neq z$ 
    then  $\text{key}[z] \leftarrow \text{key}[y]$ 
if  $\text{color}[y] = \text{BLACK}$ 
    then RB-DELETE-FIXUP( $T, x$ )
return  $y$ 
```



RB-DELETE(T, z)

```
if left[z]=nil or right[z]=nil[T]
    then  $y \leftarrow z$ 
    else  $y \leftarrow \text{TREE-SUCCESSOR}(z)$ 
if left[y]  $\neq$  nil[T]
    then  $x \leftarrow \text{left}[y]$ 
    else  $x \leftarrow \text{right}[y]$ 
 $p[x] \leftarrow p[y]$ 
if  $p[y] = \text{nil}[T]$ 
    then  $\text{root}[T] \leftarrow x$ 
    else if  $y = \text{left}[p[y]]$ 
        then  $\text{left}[p[y]] \leftarrow x$ 
        else  $\text{right}[p[y]] \leftarrow x$ 
if  $y \neq z$ 
    then  $\text{key}[z] \leftarrow \text{key}[y]$ 
if  $\text{color}[y] = \text{BLACK}$ 
    then RB-DELETE-FIXUP( $T, x$ )
return y
```



RB-DELETE(T, z), donde
 $\text{key}[z] = 5$

RB-DELETE(T, z)

if $\text{left}[z] = \text{nil}$ or $\text{right}[z] = \text{nil}[T]$

then $y \leftarrow z$

else $y \leftarrow \text{TREE-SUCCESSOR}(z)$

if $\text{left}[y] \neq \text{nil}[T]$

then $x \leftarrow \text{left}[y]$

else $x \leftarrow \text{right}[y]$

$p[x] \leftarrow p[y]$

if $p[y] = \text{nil}[T]$

then $\text{root}[T] \leftarrow x$

else if $y = \text{left}[p[y]]$

then $\text{left}[p[y]] \leftarrow x$

else $\text{right}[p[y]] \leftarrow x$

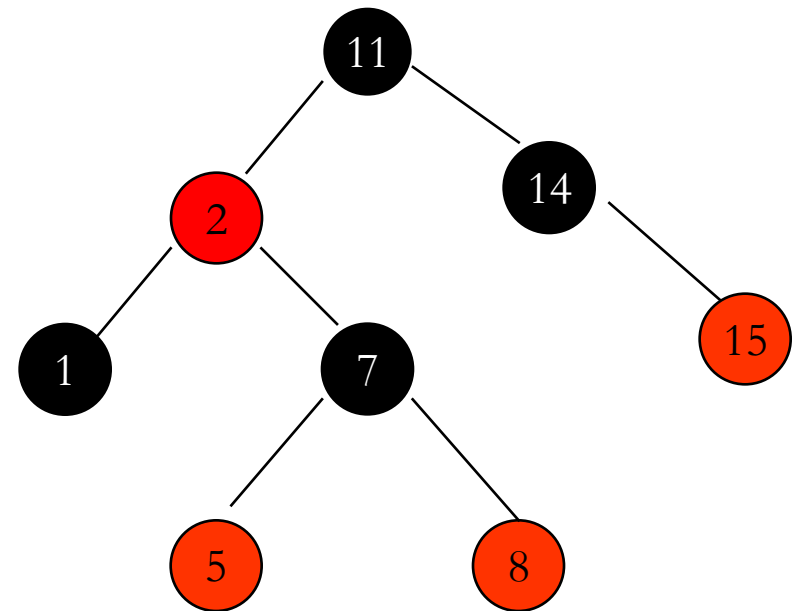
if $y \neq z$

then $\text{key}[z] \leftarrow \text{key}[y]$

if $\text{color}[y] = \text{BLACK}$

then RB-DELETE-FIXUP(T, x)

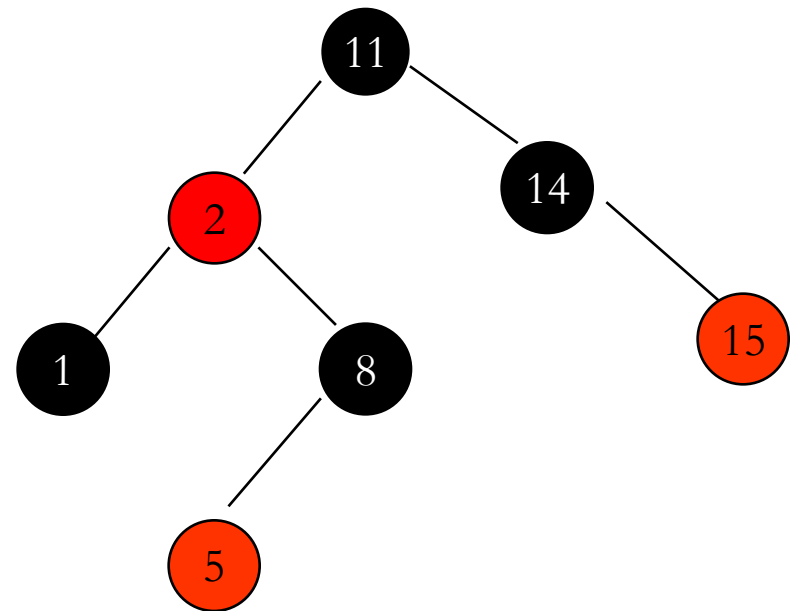
return y



RB-DELETE(T, z), donde
 $\text{key}[z] = 7$

RB-DELETE(T, z)

```
if left[z]=nil or right[z]=nil[T]
    then  $y \leftarrow z$ 
    else  $y \leftarrow \text{TREE-SUCCESSOR}(z)$ 
if left[y]  $\neq$  nil[T]
    then  $x \leftarrow \text{left}[y]$ 
    else  $x \leftarrow \text{right}[y]$ 
 $p[x] \leftarrow p[y]$ 
if  $p[y] = \text{nil}[T]$ 
    then  $\text{root}[T] \leftarrow x$ 
    else if  $y = \text{left}[p[y]]$ 
        then  $\text{left}[p[y]] \leftarrow x$ 
        else  $\text{right}[p[y]] \leftarrow x$ 
if  $y \neq z$ 
    then  $\text{key}[z] \leftarrow \text{key}[y]$ 
if  $\text{color}[y] = \text{BLACK}$ 
    then RB-DELETE-FIXUP( $T, x$ )
return y
```



RB-DELETE(T, z), donde
 $\text{key}[z] = 7$

Se cambian las llaves entre
7 y 8, y se deja de color
negro el nodo (que ahora
tiene el valor 8)

RB-DELETE(T, z)

if $\text{left}[z] = \text{nil}$ or $\text{right}[z] = \text{nil}[T]$

then $y \leftarrow z$

else $y \leftarrow \text{TREE-SUCCESSOR}(z)$

if $\text{left}[y] \neq \text{nil}[T]$

then $x \leftarrow \text{left}[y]$

else $x \leftarrow \text{right}[y]$

$p[x] \leftarrow p[y]$

if $p[y] = \text{nil}[T]$

then $\text{root}[T] \leftarrow x$

else if $y = \text{left}[p[y]]$

then $\text{left}[p[y]] \leftarrow x$

else $\text{right}[p[y]] \leftarrow x$

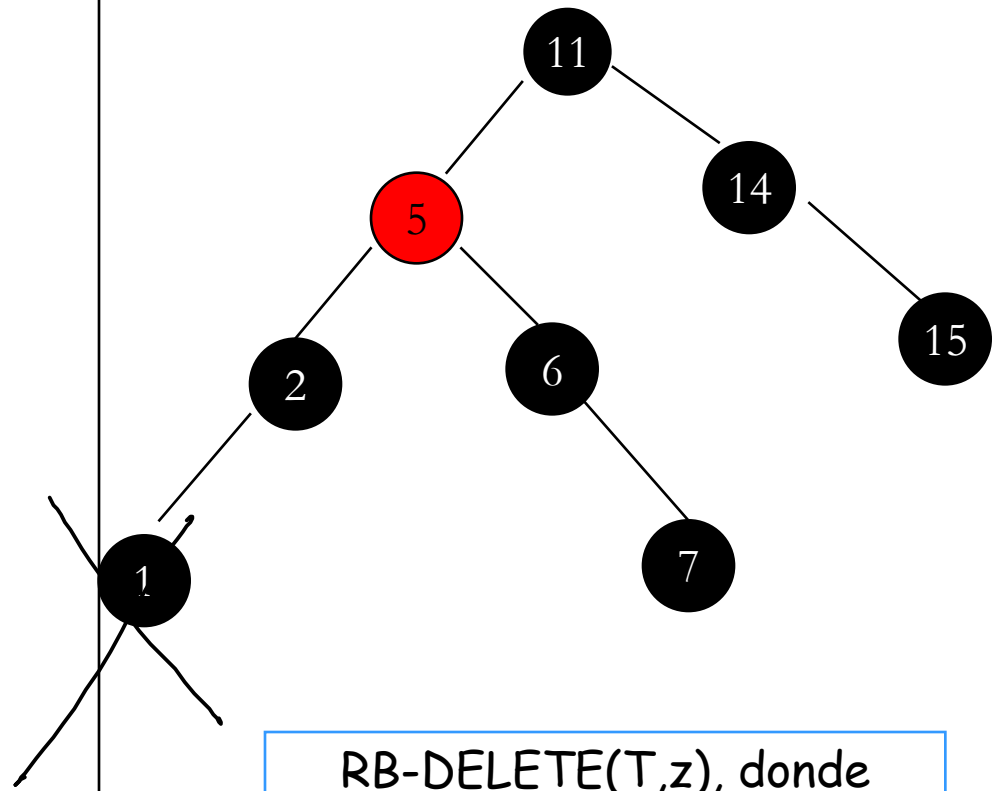
if $y \neq z$

then $\text{key}[z] \leftarrow \text{key}[y]$

if $\text{color}[y] = \text{BLACK}$

then RB-DELETE-FIXUP(T, x)

return y



RB-DELETE(T, z), donde
 $\text{key}[z] = 1$

Es necesario un ajuste

RB-DELETE-FIXUP(T, x)

while $x \neq \text{root}[T]$ and $\text{color}[x] = \text{BLACK}$

do if $x = \text{left}[p[x]]$

then $w \leftarrow \text{right}[p[x]]$

if $\text{color}[w] = \text{RED}$

then $\text{color}[w] \leftarrow \text{BLACK}$

$\text{color}[p[x]] \leftarrow \text{RED}$

LEFT-ROTATE(T, p[x])

$w \leftarrow \text{right}[p[x]]$

if $\text{color}[\text{left}[w]] = \text{BLACK}$ and $\text{color}[\text{right}[w]] = \text{BLACK}$

then $\text{color}[w] \leftarrow \text{RED}$

$x \leftarrow p[x]$

else if $\text{color}[\text{right}[w]] = \text{BLACK}$

then $\text{color}[\text{left}[w]] \leftarrow \text{BLACK}$

$\text{color}[w] \leftarrow \text{RED}$

RIGHT-ROTATE(T, w)

$w \leftarrow \text{right}[p[x]]$

$\text{color}[w] \leftarrow \text{color}[p[x]]$

$\text{color}[p[x]] \leftarrow \text{BLACK}$

$\text{color}[\text{right}[w]] \leftarrow \text{BLACK}$

LEFT-ROTATE(T, p[x])

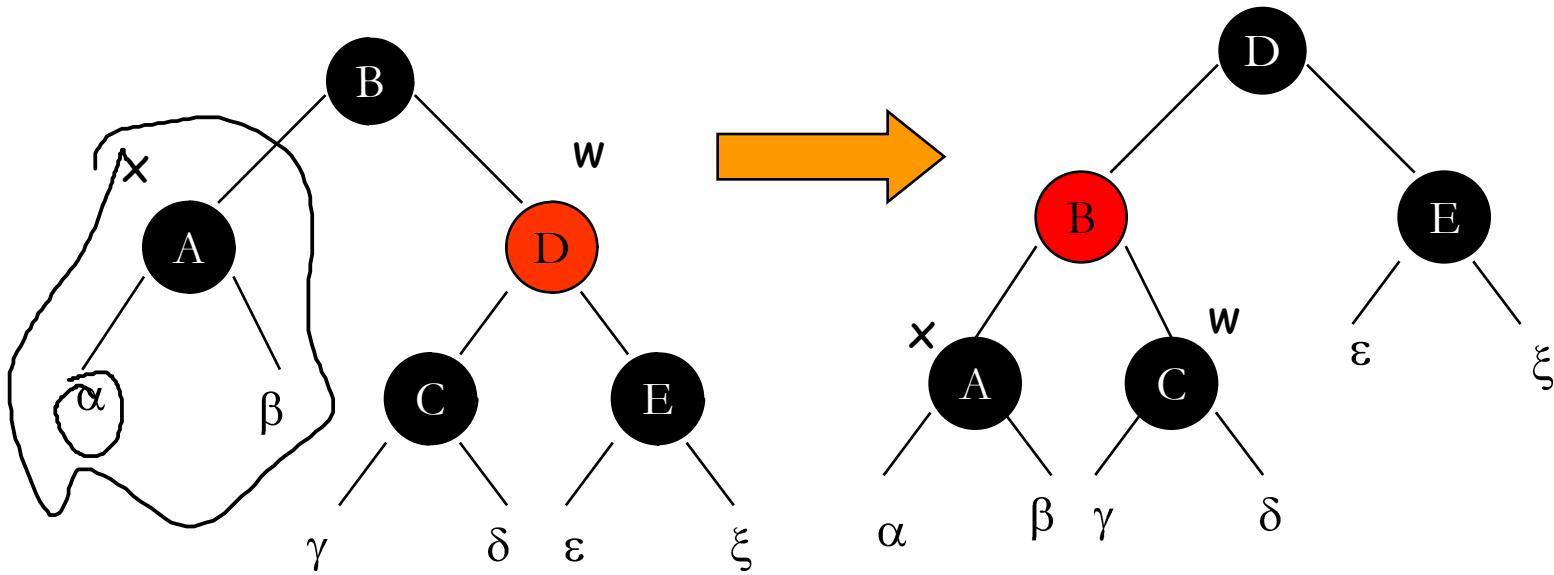
$x \leftarrow \text{root}[T]$

else #código simétrico intercambiando right y left

$\text{color}[x] \leftarrow \text{BLACK}$

Árboles rojinegros

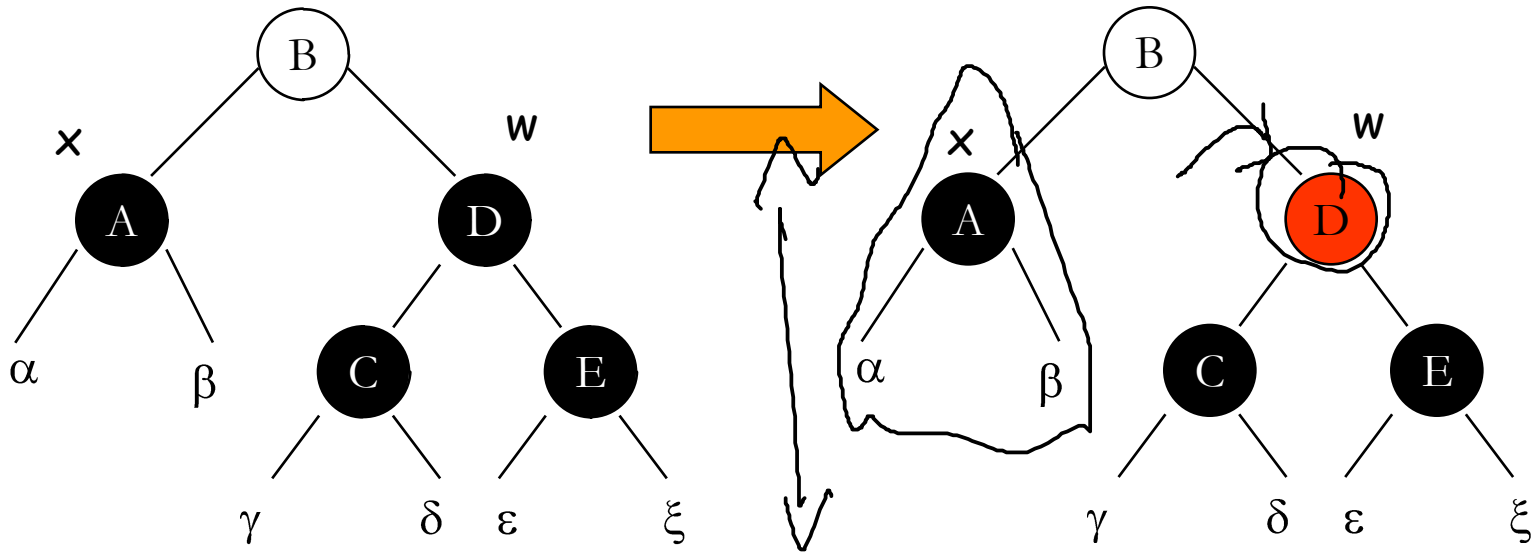
Caso 1:



Se cambian los colores de B y D, y se realiza rotación a la izquierda
Este cambio genera uno de los 3 casos siguientes

Árboles rojinegros

Caso 2:

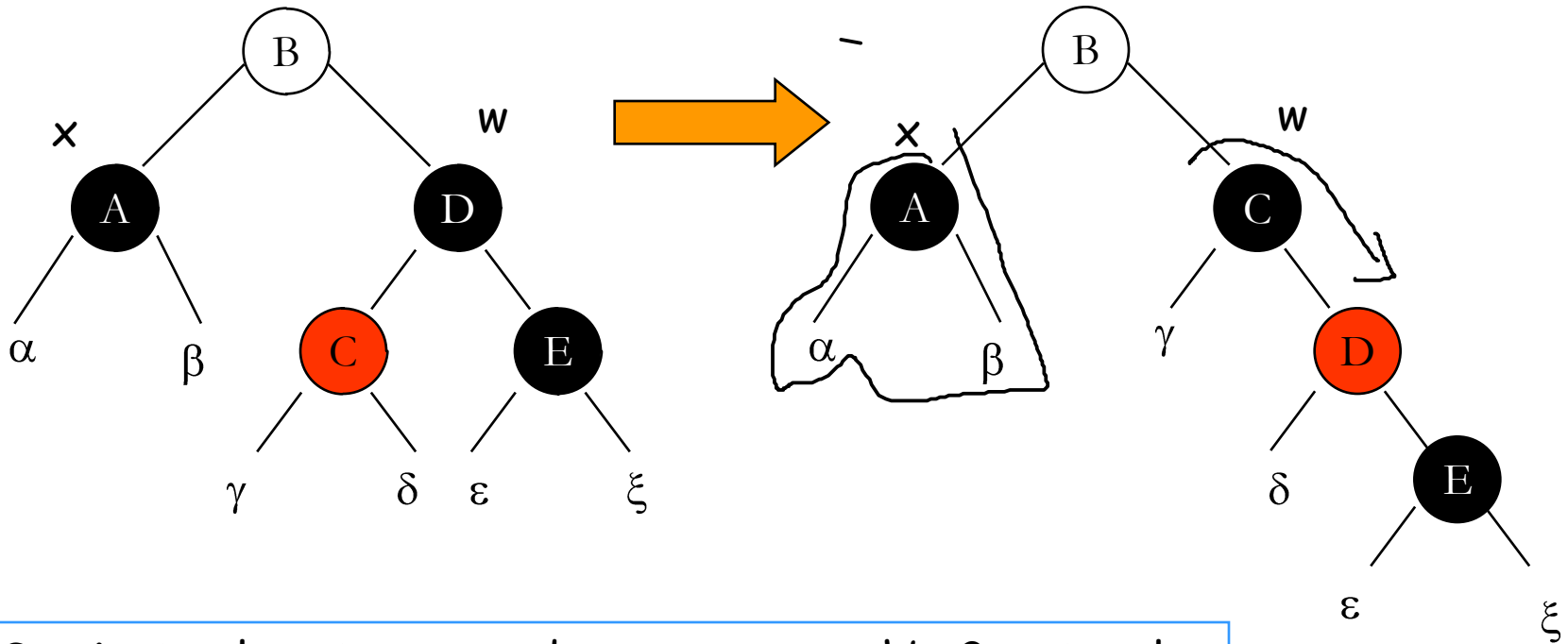


La estrategia del algoritmo consiste en considerar el nodo x como si tuviera un nodo extra, aumenta el conteo de negro en 2

En la rama de A, como se eliminó un nodo, el conteo de nodos negros se debe disminuir al lado derecho de B, para esto, se colorea de rojo el nodo con dos hijos negros

Árboles rojinegros

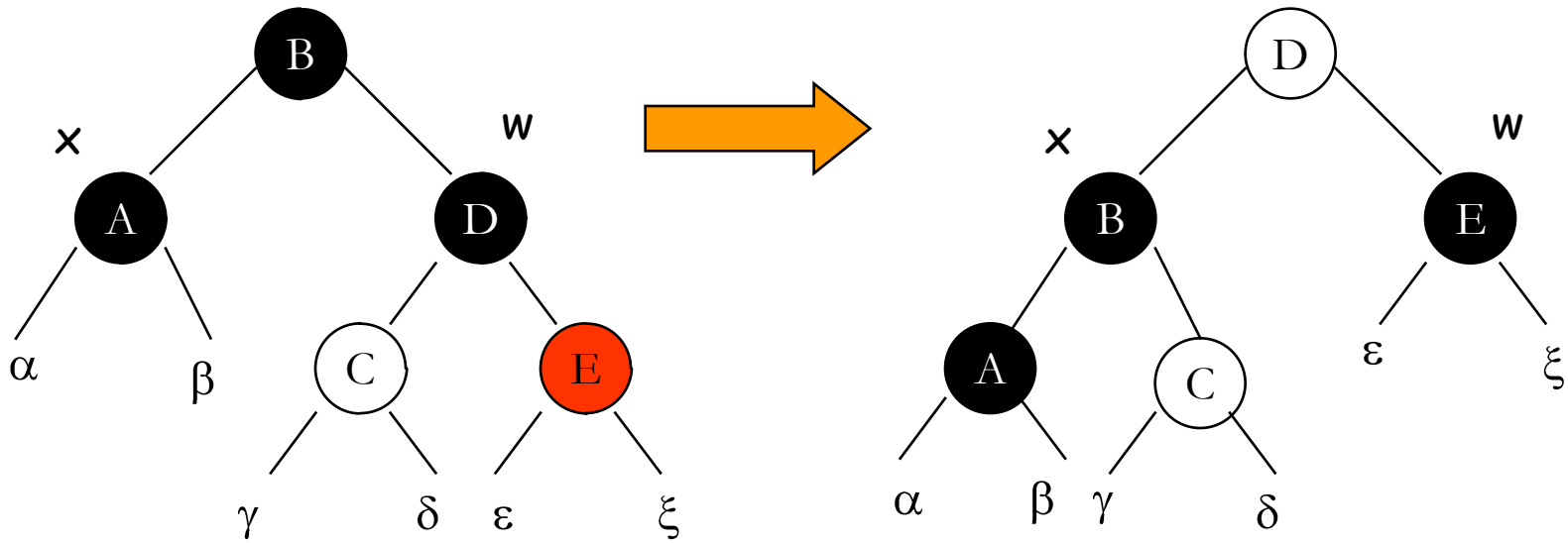
Caso 3:



Se ajusta el conteo creando una rama con $hb=2$, antes, la rama B-D-C no tenía conteo 2

Árboles rojinegros

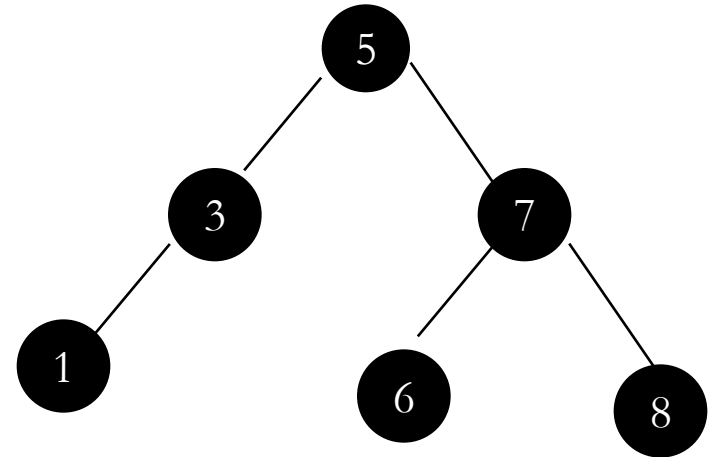
Caso 4:



Para completar el conteo por la rama de A, se rota a la izquierda B, el nodo E se cambia de color

RB-DELETE-FIXUP(T, x)

```
while x ≠ root[T] and color[x] = BLACK
  do if x = left[p[x]]
    then w ← right[p[x]]
    if color[w] = RED
      then color[w] ← BLACK
      color[p[x]] ← RED
      LEFT-ROTATE(T, p[x])
      w ← right[p[x]]
    if color[left[w]] = BLACK and color[right[w]] = BLACK
      then color[w] ← RED
      x ← p[x]
    else if color[right[w]] = BLACK
      then color[left[w]] ← BLACK
      color[w] ← RED
      RIGHT-ROTATE(T, w)
      w ← right[p[x]]
    color[w] ← color[p[x]]
    color[p[x]] ← BLACK
    color[right[w]] ← BLACK
    LEFT-ROTATE(T, p[x])
    x ← root[T]
  else #código simétrico intercambiando right y left
    color[x] ← BLACK
```

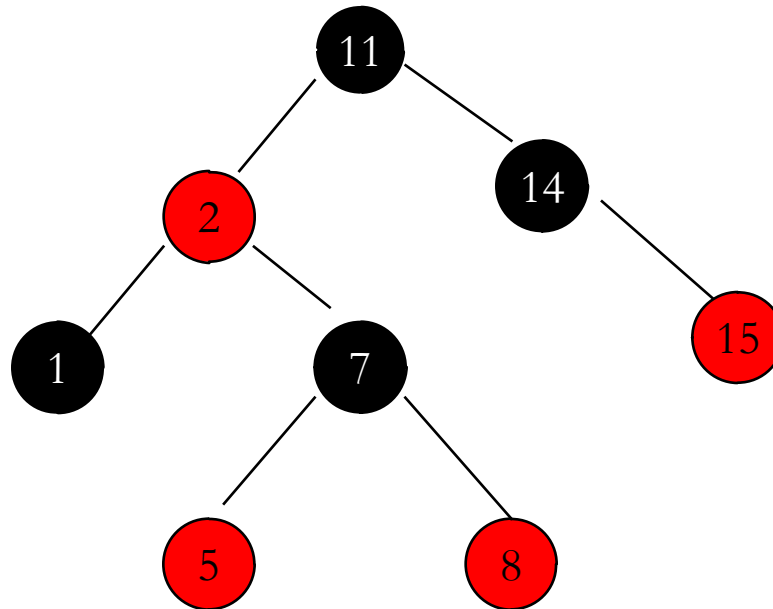


Siga el algoritmo
RB-DELETE(T, 1)

Árboles rojinegros

Eliminación

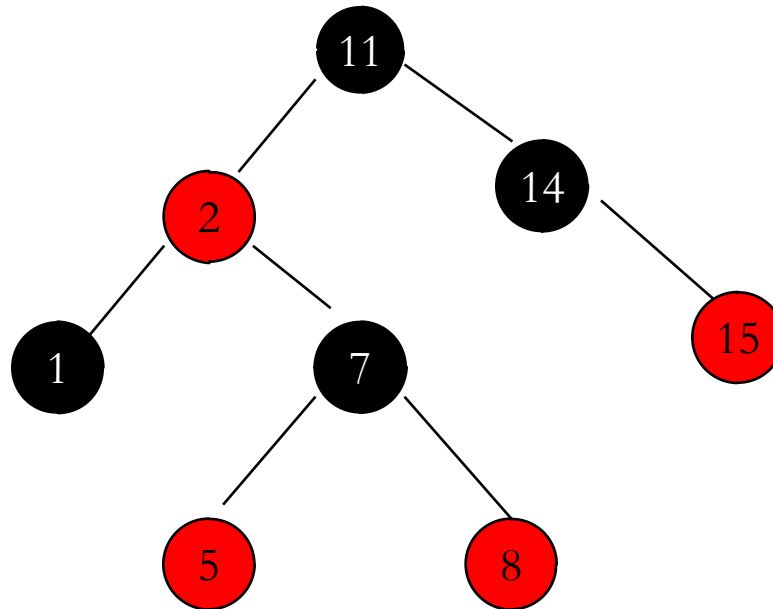
Dado T , siga el algoritmo RB-DELETE($T, 7$)



Árboles rojinegros

Eliminación

Dado T , siga el algoritmo RB-DELETE($T, 7$)



Árboles rojinegros

Eliminación

Dado T , siga el algoritmo $\text{RB-DELETE}(T, 4)$

