

# Complejidad computacional I

Clase 20

IIC 1253

Pedro Bahamondes

# Outline

**Introducción**

Complejidad de algoritmos iterativos

Ecuaciones de recurrencia

Epílogo

# Algoritmos

El análisis de algoritmos consta de dos partes

- Estudiar cuándo y por qué los algoritmos son **correctos** (es decir, hacen lo que dicen que hacen).
- Estimar la cantidad de **recursos** computacionales que un algoritmo necesita para su ejecución.

Hoy estudiaremos cómo medir el segundo punto,  
y lo aplicaremos a algoritmos iterativos y recursivos



# Objetivos de la clase

- Estudiar la complejidad de algoritmos iterativos
- Aplicar notación asintótica a algoritmos iterativos
- Definir ecuaciones de recurrencia en algoritmos recursivos
- Estudiar la complejidad de algoritmos recursivos

# Outline

Introducción

**Complejidad de algoritmos iterativos**

Ecuaciones de recurrencia

Epílogo

## Volviendo a complejidad...

Queremos encontrar una función  $T(n)$  que modele el tiempo de ejecución de un algoritmo.

- Donde  $n$  es el tamaño del input.

# Volviendo a complejidad...

Queremos encontrar una función  $T(n)$  que modele el tiempo de ejecución de un algoritmo.

- Donde  $n$  es el tamaño del input.
- No queremos valores exactos de  $T$  para cada  $n$ , sino que una notación asintótica para ella.



# Volviendo a complejidad...

Queremos encontrar una función  $T(n)$  que modele el tiempo de ejecución de un algoritmo.

- Donde  $n$  es el tamaño del input.
- No queremos valores exactos de  $T$  para cada  $n$ , sino que una notación asintótica para ella.
- Para encontrar  $T$ , contamos las instrucciones ejecutadas por el algoritmo.

# Volviendo a complejidad...

Queremos encontrar una función  $T(n)$  que modele el tiempo de ejecución de un algoritmo.

- Donde  $n$  es el tamaño del input.
- No queremos valores exactos de  $T$  para cada  $n$ , sino que una notación asintótica para ella.
- Para encontrar  $T$ , contamos las instrucciones ejecutadas por el algoritmo.
- A veces contaremos cierto tipo de instrucciones que son relevantes para un algoritmo particular.

# Contando instrucciones

## Ejercicio

Considere el siguiente trozo de código:

```
1  $x \leftarrow 0$   
2 for  $i = 1$  to  $n$  do  
3   for  $j = 1$  to  $i$  do  
4      $x \leftarrow x + 1$ 
```

Encuentre una notación asintótica para la cantidad de veces que se ejecuta la instrucción 4 en función de  $n$ .

Solución: Apuntes Jorge Pérez, Sección 3.1.3, páginas 104 y 105.

# Contando instrucciones

## Ejercicio

Considere el siguiente trozo de código:

```
1  $x \leftarrow 0$   
2  $j \leftarrow n$   
3 while  $j \geq 1$  do  
4   for  $i = 1$  to  $j$  do  
5      $x \leftarrow x + 1$   
6    $j \leftarrow \lfloor \frac{j}{2} \rfloor$ 
```

Encuentre una notación asintótica para la cantidad de veces que se ejecuta la instrucción 5 en función de  $n$ .

Solución: Apuntes Jorge Pérez, Sección 3.1.3, página 105.

# Algoritmos iterativos

Consideremos el siguiente algoritmo de búsqueda en arreglos:

**input** : arreglo de enteros  $A = [a_0, \dots, a_{n-1}]$ , un natural  $n > 0$   
correspondiente al largo del arreglo y un entero  $k$

**output**: índice de  $k$  en  $A$ ,  $-1$  si no está.

Búsqueda( $A, n, k$ ):

```
1  for  $i = 0$  to  $n - 1$  do
2      if  $a_i = k$  then
3          return  $i$ 
4  return  $-1$ 
```

# Algoritmos iterativos

¿Qué instrucción(es) contamos?

- Deben ser representativas de lo que hace el problema.
- En este caso, por ejemplo 3 y 4 no lo son (¿por qué?).

# Algoritmos iterativos

¿Qué instrucción(es) contamos?

- Deben ser representativas de lo que hace el problema.
- En este caso, por ejemplo 3 y 4 no lo son (¿por qué?).
- La instrucción 2 sí lo sería, y más específicamente la comparación.

# Algoritmos iterativos

¿Qué instrucción(es) contamos?

- Deben ser representativas de lo que hace el problema.
- En este caso, por ejemplo 3 y 4 no lo son (¿por qué?).
- La instrucción 2 sí lo sería, y más específicamente la comparación.
  - Las comparaciones están entre las instrucciones que se cuentan típicamente, sobre todo en búsqueda y ordenación.

¿Respecto a qué parámetro buscamos la notación asintótica?

- En el ejemplo, es natural pensar en el tamaño del arreglo  $n$ .

**En conclusión:** queremos encontrar una notación asintótica (ojalá  $\Theta$ ) para la cantidad de veces que se ejecuta la comparación de la línea 2 en función de  $n$ . Llamaremos a esta cantidad  $T(n)$ .



# Algoritmos iterativos

Ahora, ¿ $T(n)$  depende sólo de  $n$ ?

- El contenido del arreglo influye en la ejecución del algoritmo.
- Estimaremos entonces el tiempo para el **peor caso** (cuando el input hace que el algoritmo se demore la mayor cantidad de tiempo posible) y el **mejor caso** (lo contrario) para un tamaño de input  $n$ .

En nuestro ejemplo:

- **Mejor caso:**  $a_0 = k$ . Aquí la línea 2 se ejecuta una vez, y luego  $T(n)$  es  $\Theta(1)$ .
- **Peor caso:**  $k$  no está en  $A$ . La línea 2 se ejecutará tantas veces como elementos en  $A$ , y entonces  $T(n)$  es  $\Theta(n)$ .
- Diremos entonces que el algoritmo BÚSQUEDA es de **complejidad**  $\Theta(n)$  o lineal en el peor caso, y  $\Theta(1)$  o constante en el mejor caso.

# Algoritmos iterativos

## Ejercicio

Determine la complejidad en el mejor y peor caso:

**input** : arreglo  $A = [a_0, \dots, a_{n-1}]$  y su largo  $n > 0$

**output**: arreglo está ordenado al terminar el algoritmo.

InsertionSort( $A, n$ ):

```
1   for  $i = 1$  to  $n - 1$  do  
2        $j \leftarrow i$   
3       while  $a_{j-1} > a_j \wedge j > 0$  do  
4            $t \leftarrow a_{j-1}$   
5            $a_{j-1} \leftarrow a_j$   
6            $a_j \leftarrow t$   
7            $j \leftarrow j - 1$ 
```

Solución: Apuntes Jorge Pérez, Sección 3.1.3, página 106.

# Algoritmos iterativos

En general, nos conformaremos con encontrar la complejidad del peor caso.

- Es la que más interesa, al decirnos qué tan mal se puede comportar un algoritmo en la práctica.

Además, a veces puede ser difícil encontrar una notación  $\Theta$ .

- ¿Con qué nos basta?
- Es suficiente con una buena estimación  $O$ , tanto para el mejor y el peor caso.
- Nos da una cota superior para el tiempo de ejecución del algoritmo.

# Outline

Introducción

Complejidad de algoritmos iterativos

Ecuaciones de recurrencia

Epílogo

# Algoritmos recursivos

# Algoritmos recursivos

En el caso de los algoritmos recursivos, el principio es el mismo: contar instrucciones.

# Algoritmos recursivos

En el caso de los algoritmos recursivos, el principio es el mismo: contar instrucciones.

- Buscamos alguna(s) instrucción(es) representativa.

# Algoritmos recursivos

En el caso de los algoritmos recursivos, el principio es el mismo: contar instrucciones.

- Buscamos alguna(s) instrucción(es) representativa.
- Contamos cuántas veces se ejecuta en cada ejecución del algoritmo.



# Algoritmos recursivos

En el caso de los algoritmos recursivos, el principio es el mismo: contar instrucciones.

- Buscamos alguna(s) instrucción(es) representativa.
- Contamos cuántas veces se ejecuta en cada ejecución del algoritmo.
- ¿Cuál es la diferencia?

# Algoritmos recursivos

En el caso de los algoritmos recursivos, el principio es el mismo: contar instrucciones.

- Buscamos alguna(s) instrucción(es) representativa.
- Contamos cuántas veces se ejecuta en cada ejecución del algoritmo.
- ¿Cuál es la diferencia?

Ahora tenemos que considerar llamados recursivos

## Algoritmos recursivos: un ejemplo

## Algoritmos recursivos: un ejemplo

**input** : Arreglo ordenado  $A[0, \dots, n-1]$ , elemento  $x$ , índices  $i, f$

**output**: Índice  $m \in \{0, \dots, n-1\}$  tq  $A[m] = x$  si  $x$  está en  $A$ , o  $-1$

BinarySearch( $A, x, i = 0, f = n-1$ ):

```
1  if  $i > f$  then
2      return  $-1$ 
3  else if  $i = f$  then
4      if  $A[i] = x$  then
5          return  $i$ 
6      else
7          return  $-1$ 
8  else
9       $m \leftarrow \lfloor (i + f)/2 \rfloor$ 
10     if  $A[m] < x$  then
11         return BinarySearch( $A, x, m + 1, f$ )
12     else if  $A[m] > x$  then
13         return BinarySearch( $A, x, i, m - 1$ )
14     else
15         if  $A[m] = x$  then return  $m$ 
```

# Algoritmos recursivos: un ejemplo

- ¿Qué operaciones contamos?

# Algoritmos recursivos: un ejemplo

- ¿Qué operaciones contamos?
- ¿Cuál es el peor caso?

# Algoritmos recursivos: un ejemplo

- ¿Qué operaciones contamos?
- ¿Cuál es el peor caso?

## Ejercicio

Encuentre una función  $T(n)$  para la cantidad de comparaciones que realiza el algoritmo `BinarySearch` en el peor caso, en función del tamaño del arreglo.

# Algoritmos recursivos: un ejemplo

- ¿Qué operaciones contamos?
- ¿Cuál es el peor caso?

## Ejercicio

Encuentre una función  $T(n)$  para la cantidad de comparaciones que realiza el algoritmo `BinarySearch` en el peor caso, en función del tamaño del arreglo.

**Respuesta:**

$$T(n) = \begin{cases} 3 & n = 1 \\ T(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor) + 4 & n > 1 \end{cases}$$



# Algoritmos recursivos: un ejemplo

- ¿Qué operaciones contamos?
- ¿Cuál es el peor caso?

## Ejercicio

Encuentre una función  $T(n)$  para la cantidad de comparaciones que realiza el algoritmo `BinarySearch` en el peor caso, en función del tamaño del arreglo.

**Respuesta:**

$$T(n) = \begin{cases} 3 & n = 1 \\ T(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor) + 4 & n > 1 \end{cases}$$

Esta es una **ecuación de recurrencia**.

# Algoritmos recursivos: un ejemplo

- ¿Qué operaciones contamos?
- ¿Cuál es el peor caso?

## Ejercicio

Encuentre una función  $T(n)$  para la cantidad de comparaciones que realiza el algoritmo `BinarySearch` en el peor caso, en función del tamaño del arreglo.

**Respuesta:**

$$T(n) = \begin{cases} 3 & n = 1 \\ T(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor) + 4 & n > 1 \end{cases}$$

Esta es una **ecuación de recurrencia**.

¿Cómo obtenemos una fórmula explícita?

# Algoritmos recursivos: un ejemplo

## Ejercicio

Encuentre una función  $T(n)$  para la cantidad de comparaciones que realiza el algoritmo `BinarySearch` en el peor caso, en función del tamaño del arreglo.

Contaremos las comparaciones. Dividiremos el análisis del peor caso:

- Si el arreglo tiene largo 1, entramos en la instrucción 3 y luego hay una comparación  $\Rightarrow T(n) = 3$ , con  $n = 1$ .
- Si el arreglo tiene largo mayor a 1, el peor caso es entrar en el `else` de 8 y luego en la segunda llamada recursiva. En tal caso, se hacen las comparaciones de las líneas 1, 3, 10, 12 a lo que sumamos las comparaciones que haga la llamada recursiva, que serán  $T(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor)$ .

Entonces, nuestra función  $T(n)$  será:

$$T(n) = \begin{cases} 3 & n = 1 \\ T(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor) + 4 & n > 1 \end{cases}$$

# Algoritmos recursivos: ecuaciones de recurrencia

Necesitamos *resolver* esta ecuación de recurrencia.

# Algoritmos recursivos: ecuaciones de recurrencia

Necesitamos *resolver* esta ecuación de recurrencia.

- Es decir, encontrar una expresión que no dependa de  $T$ , sólo de  $n$ .

# Algoritmos recursivos: ecuaciones de recurrencia

Necesitamos *resolver* esta ecuación de recurrencia.

- Es decir, encontrar una expresión que no dependa de  $T$ , sólo de  $n$ .
- Técnica básica: sustitución de variables.

# Algoritmos recursivos: ecuaciones de recurrencia

Necesitamos *resolver* esta ecuación de recurrencia.

- Es decir, encontrar una expresión que no dependa de  $T$ , sólo de  $n$ .
- Técnica básica: sustitución de variables.

¿Cuál sustitución para  $n$  nos serviría en el caso anterior?

# Algoritmos recursivos: ecuaciones de recurrencia

Necesitamos *resolver* esta ecuación de recurrencia.

- Es decir, encontrar una expresión que no dependa de  $T$ , sólo de  $n$ .
- Técnica básica: sustitución de variables.

¿Cuál sustitución para  $n$  nos serviría en el caso anterior?

$$T(n) = \begin{cases} 3 & n = 1 \\ T(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor) + 4 & n > 1 \end{cases}$$



# Algoritmos recursivos: ecuaciones de recurrencia

Necesitamos *resolver* esta ecuación de recurrencia.

- Es decir, encontrar una expresión que no dependa de  $T$ , sólo de  $n$ .
- Técnica básica: sustitución de variables.

¿Cuál sustitución para  $n$  nos serviría en el caso anterior?

$$T(n) = \begin{cases} 3 & n = 1 \\ T(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor) + 4 & n > 1 \end{cases}$$

## Ejercicio

Resuelva la ecuación ocupando la sustitución  $n = 2^k$ .

# Algoritmos recursivos: ecuaciones de recurrencia

Necesitamos *resolver* esta ecuación de recurrencia.

- Es decir, encontrar una expresión que no dependa de  $T$ , sólo de  $n$ .
- Técnica básica: sustitución de variables.

¿Cuál sustitución para  $n$  nos serviría en el caso anterior?

$$T(n) = \begin{cases} 3 & n = 1 \\ T(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor) + 4 & n > 1 \end{cases}$$

## Ejercicio

Resuelva la ecuación ocupando la sustitución  $n = 2^k$ .

**Respuesta:**  $T(n) = 4 \cdot \log_2(n) + 3$ , con  $n$  potencia de 2.

# Algoritmos recursivos: ecuaciones de recurrencia

## Ejercicio

Resuelva la ecuación ocupando la sustitución  $n = 2^k$ .

$$T(2^k) = \begin{cases} 3 & k = 0 \\ T(2^{k-1}) + 4 & k > 0 \end{cases}$$

Expandiendo el caso recursivo:

$$\begin{aligned} T(2^k) &= T(2^{k-1}) + 4 \\ &= (T(2^{k-2}) + 4) + 4 \\ &= T(2^{k-2}) + 8 \\ &= (T(2^{k-3}) + 4) + 8 \\ &= T(2^{k-3}) + 12 \\ &\vdots \end{aligned}$$

# Algoritmos recursivos: ecuaciones de recurrencia

## Ejercicio

Resuelva la ecuación ocupando la sustitución  $n = 2^k$ .

Deducimos una expresión general para  $k - i \geq 0$ :

$$T(2^k) = T(2^{k-i}) + 4i$$

Tomamos  $i = k$ :

$$T(2^k) = T(1) + 4k = 3 + 4k$$

Como  $k = \log_2(n)$ :

$$T(n) = 4 \cdot \log_2(n) + 3, \text{ con } n \text{ potencia de } 2$$

# Algoritmos recursivos: ecuaciones de recurrencia

## Ejercicio

Resuelva la ecuación ocupando la sustitución  $n = 2^k$ .

Deducimos una expresión general para  $k - i \geq 0$ :

$$T(2^k) = T(2^{k-i}) + 4i$$

Tomamos  $i = k$ :

$$T(2^k) = T(1) + 4k = 3 + 4k$$

Como  $k = \log_2(n)$ :

$$T(n) = 4 \cdot \log_2(n) + 3, \text{ con } n \text{ potencia de } 2$$

Problema: esto solo es válido cuando  $n = 2^k$

# Notación asintótica condicional

Sea  $P \subseteq \mathbb{N}$ .

## Definición

$$O(f \mid P) = \{g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^+ \mid (\exists c \in \mathbb{R}^+)(\exists n_0 \in \mathbb{N})(\forall n \geq n_0) \\ (n \in P \rightarrow g(n) \leq c \cdot f(n))\}$$

# Notación asintótica condicional

Sea  $P \subseteq \mathbb{N}$ .

## Definición

$$O(f \mid P) = \{g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^+ \mid (\exists c \in \mathbb{R}^+)(\exists n_0 \in \mathbb{N})(\forall n \geq n_0) \\ (n \in P \rightarrow g(n) \leq c \cdot f(n))\}$$

Las notaciones  $\Omega(f \mid P)$  y  $\Theta(f \mid P)$  se definen análogamente.

Estamos restringiendo a un tipo de  $n$  particular

## Volviendo al ejemplo...

Tenemos que  $T(n) = 4 \cdot \log_2(n) + 3$ , con  $n$  potencia de 2. ¿Qué podemos decir sobre la complejidad de  $T$ ?



## Volviendo al ejemplo...

Tenemos que  $T(n) = 4 \cdot \log_2(n) + 3$ , con  $n$  potencia de 2. ¿Qué podemos decir sobre la complejidad de  $T$ ?

Sea  $POTENCIA_2 = \{2^i \mid i \in \mathbb{N}\}$ . Entonces:

$$T \in \Theta(\log_2(n) \mid POTENCIA_2)$$

## Volviendo al ejemplo...

Tenemos que  $T(n) = 4 \cdot \log_2(n) + 3$ , con  $n$  potencia de 2. ¿Qué podemos decir sobre la complejidad de  $T$ ?

Sea  $POTENCIA_2 = \{2^i \mid i \in \mathbb{N}\}$ . Entonces:

$$T \in \Theta(\log_2(n) \mid POTENCIA_2)$$

Pero queremos concluir que  $T \in \Theta(\log_2(n)) \dots$

Usaremos inducción

# Generalización de soluciones usando inducción

Para el ejemplo anterior:

## Ejercicio

Demuestre que si  $T \in O(\log_2(n) \mid POTENCIA_2)$ , entonces  $T \in O(\log n)$ .

# Generalización de soluciones usando inducción

Para el ejemplo anterior:

## Ejercicio

Demuestre que si  $T \in O(\log_2(n) \mid POTENCIA_2)$ , entonces  $T \in O(\log n)$ .

Algunas observaciones:

- Demostraremos que  $(\exists c \in \mathbb{R}^+)(\exists n_0 \in \mathbb{N})(\forall n \geq n_0)(T(n) \leq c \cdot \log_2(n))$ .
- Primero, debemos estimar  $n_0$  y  $c$  (expandiendo  $T$  por ejemplo).
- ¿Cuál principio de inducción usamos?

# Generalización de soluciones usando inducción

## Ejercicio

Demuestre que si  $T \in O(\log_2(n) \mid POTENCIA_2)$ , entonces  $T \in O(\log n)$ .

Veamos los primeros valores de  $T(n)$  para estimar  $c$  y  $n_0$ :

$$T(1) = 3$$

$$T(2) = T(1) + 4 = 7$$

$$T(3) = T(1) + 4 = 7$$

$$T(4) = T(2) + 4 = 11$$

Podríamos tomar  $c = 7$  y  $n_0 = 2$ , pues con  $n = 1$ :

$$T(1) = 3 \not\leq 7 \cdot \log_2(1) = 0$$

y con  $n = 2$

$$T(2) = 7 \leq 7 \cdot \log_2(2) = 7$$

# Generalización de soluciones usando inducción

## Ejercicio

Demuestre que si  $T \in O(\log_2(n) \mid POTENCIA_2)$ , entonces  $T \in O(\log n)$ .

Veamos los primeros valores de  $T(n)$  para estimar  $c$  y  $n_0$ :

$$T(1) = 3$$

$$T(2) = T(1) + 4 = 7$$

$$T(3) = T(1) + 4 = 7$$

$$T(4) = T(2) + 4 = 11$$

Podríamos tomar  $c = 7$  y  $n_0 = 2$ , pues con  $n = 1$ :

$$T(1) = 3 \not\leq 7 \cdot \log_2(1) = 0$$

y con  $n = 2$

$$T(2) = 7 \leq 7 \cdot \log_2(2) = 7$$

La intuición nos dice  $n_0 = 2$  y  $c = 7$ . . . lo demostraremos

# Generalización de soluciones usando inducción

## Ejercicio

Demuestre que si  $T \in O(\log_2(n) \mid POTENCIA_2)$ , entonces  $T \in O(\log n)$ .

PD:  $\forall n \geq 2, T(n) \leq 7 \cdot \log_2(n)$ . Por inducción fuerte:

**BI:** Además de  $n = 2$ , debemos mostrar la base para  $n = 3$ , puesto que depende de  $T(1)$  que no está incluido en el resultado que estamos mostrando.

$$T(2) = 7 = 7 \cdot \log_2(2)$$

$$T(3) = 7 < 7 \cdot \log_2(3) \text{ pues el logaritmo es creciente}$$

**HI:** Supongamos que con  $n \geq 4, \forall k \in \{2, \dots, n-1\}$  se cumple que  $T(k) \leq 7 \cdot \log_2(k)$ .

# Generalización de soluciones usando inducción

## Ejercicio

Demuestre que si  $T \in O(\log_2(n) \mid POTENCIA_2)$ , entonces  $T \in O(\log n)$ .

**TI:** Como  $n \geq 4$ :

$$\begin{aligned}T(n) &= T\left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor\right) + 4 && / \text{ HI} \\&\leq 7 \cdot \log_2\left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor\right) + 4 && / \log \text{ es creciente, sacamos el piso} \\&\leq 7 \cdot \log_2\left(\frac{n}{2}\right) + 4 && / \log \text{ de división} \\&= 7(\log_2(n) - \log_2(2)) + 4 \\&= 7 \cdot \log_2(n) - 7 + 4 \\&= 7 \cdot \log_2(n) - 3 \\&< 7 \cdot \log_2(n) \square\end{aligned}$$



# Outline

Introducción

Complejidad de algoritmos iterativos

Ecuaciones de recurrencia

**Epílogo**

# Objetivos de la clase

- Estudiar la complejidad de algoritmos iterativos
- Aplicar notación asintótica a algoritmos iterativos
- Definir ecuaciones de recurrencia en algoritmos recursivos
- Estudiar la complejidad de algoritmos recursivos