2. Búsqueda en Espacio de Estados

2.1 Conceptos Principales

Para resolver problemas en IA, formalizamos el mundo como un conjunto de estados y transiciones.

1. **Espacio de Estados**: Conjunto de todos los estados alcanzables desde el estado inicial mediante una secuencia de operadores
2. **Estado Inicial**: Descripción de partida del sistema
3. **Operadores (Acciones)**: Reglas que transforman un estado en otro (ej. mover una pieza, mover el hueco en un puzle)
4. **Prueba de Meta (Goal Test)**: Condición que determina si un estado es la solución
5. **Costo de Ruta** ($g(n)$): Costo acumulado desde el inicio hasta el estado actual (ej. número de movimientos, distancia en km)

La Función de Evaluación ($f(n)$): Es una fórmula matemática fundamental para guiar la búsqueda, decidiendo qué nodo es el más "prometedor" para expandir a continuación. Asigna un valor numérico a cada nodo que representa la estimación de cuán bueno es ese camino para llegar a la solución. Permite ordenar los nodos en la "frontera" de búsqueda. El algoritmo siempre elegirá expandir el nodo con el mejor valor $f(n)$ (generalmente el menor valor si hablamos de costes).

Componentes típicos:

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

- $g(n)$: Lo que ya has recorrido (costo real desde el inicio hasta n)
- $h(n)$: Lo que te falta (estimación heurística desde n hasta la meta)

> ⓘ **Info**
>
> **Tipos de grafos generados en los procesos de búsqueda:**
>
> - **Explícito:** Es un grafo que **ya está construido y guardado en la memoria** del ordenador antes de empezar a buscar nada.
> - **Implícito:** Es un grafo que **no existe en memoria**, sino que se va **generando a medida que avanzas**. Se define mediante reglas.

2.2 Estrategias de Búsqueda: Paso a Paso

Las estrategias se dividen en **Ciegas** (sin información del dominio) y **Heurísticas** (con información/estimaciones).

> **Heurística:** Es un criterio basado en conocimiento del problema que ayuda a seleccionar los operadores o acciones más prometedoras, descartando opciones poco útiles.
> **Una heurística es como un "atajo inteligente" que evita búsquedas exhaustivas.**

2.2.1 Búsqueda a Ciegas (No Informada)

Las **estrategias de búsqueda a ciegas** (no informadas) exploran posibles soluciones sin información adicional sobre cuál camino puede ser mejor. Se utilizan principalmente en problemas donde no se tiene una **heurística** clara para guiar la búsqueda.

Características de una búsqueda:

- **Búsqueda completa:** garantiza encontrar una solución si existe.
- **Búsqueda óptima:** garantiza encontrar la mejor solución disponible.
- **Complejidad temporal:** número total de nodos explorados durante la búsqueda.
- **Complejidad espacial:** número máximo de nodos almacenados en memoria simultáneamente

Símbolos:

- **r:** factor de ramificación (promedio de sucesores por nodo)
- **p:** profundidad de la solución
- **m:** profundidad máxima
- **l:** límite de profundidad

Búsqueda en Amplitud (Breadth-First Search - BFS)

Funcionamiento: Explora nivel por nivel. Primero visita el nodo raíz, luego todos sus hijos, luego los nietos, etc.

Estructura de datos: Usa una lista ABIERTA como cola FIFO (Primero en entrar, primero en salir)

Propiedades:

- **Completa**: Sí, encuentra la solución si existe (en espacios finitos)
- **Óptima**: Sí, pero solo si el costo de los operadores es uniforme
- **Problema**: Consume muchísima memoria ($O(r^p)$) porque guarda todos los nodos del nivel actual

Búsqueda en Profundidad (Depth-First Search - DFS)

Funcionamiento: Explora una rama hasta el final antes de retroceder. Si llega a un punto muerto, vuelve atrás.

Estructura de datos: Usa una lista ABIERTA como pila LIFO (Último en entrar, primero en salir)

Propiedades:

- **Completa**: No (puede caer en bucles infinitos o ramas infinitas)
- **Óptima**: No (puede encontrar una solución muy profunda antes que una corta)
- **Ventaja**: Muy eficiente en memoria ($O(r \cdot m)$), solo guarda la rama actual

Otras Búsquedas

- **En profundidad limitada.** Se establece un límite máximo de profundidad para la exploración. Evita ciclos infinitos, pero puede perder soluciones si el límite es bajo.
- **En profundidad iterativa.** Aplica búsqueda en profundidad con límites crecientes, combinando ventajas de amplitud y profundidad. Es completa y óptima (en espacios finitos).
- **Bidireccional.** Realiza la búsqueda simultáneamente desde el estado inicial y desde el objetivo, esperando que ambas se encuentren. Reduce la complejidad temporal y espacial.

Estrategia	Completa	Óptima	Tiempo	Espacio
Amplitud	Sí	Sí	$O(r^p)$	$O(r^p)$
Profundidad	No	No	$O(r^m)$	$O(r * m)$
Prof. limitada	Si cuando $l > p$*	No	$O(r^l)$	$O(r * l)$
Iterativa	Sí	Sí	$O(r^p)$	$O(r * p)$
Bidireccional	Sí	Sí	$O(r^{(p/2)})$	$O(r^{(p/2)})$

2.2.2 Búsqueda Heurística (Informada)

A diferencia de la búsqueda a ciegas (que explora sin rumbo), la búsqueda informada utiliza una "pista" o estimación llamada **Heurística ($h(n)$)**.

- **¿Qué es una Búsqueda Informada?** Es aquella que tiene conocimiento sobre el problema (como un mapa o una brújula) para estimar cuánto falta para llegar a la meta. Esto le permite **ordenar** las opciones y probar primero las que parecen más prometedoras, en lugar de probarlas al azar.

Antes de ver los algoritmos, debemos distinguir cómo toman decisiones:

Concepto Clave: Irrevocable vs. Tentativa

Tipo de Estrategia	Definición Sencilla	Ejemplo Real
Irrevocable	**"Quemar las naves"**. Tomas una decisión y avanzas sin guardar el camino de vuelta. No puedes rectificar. Si te equivocas, fallas. Ahorra mucha memoria pero es arriesgada.	Escalar una montaña en la niebla: solo subes por donde está más empinado. Si llegas a un pico falso, no puedes bajar y buscar otro pico.
Tentativa	**"Dejar migas de pan"**. Guardas información de las alternativas no exploradas. Si un camino no funciona, puedes volver atrás (rectificar) y probar otro.	Explorar un laberinto con un hilo atado a la entrada. Si hay un muro, regresas por el hilo y pruebas otro pasillo.

Búsqueda Retroactiva (Backtracking)

*Tipo: **Tentativa** (Permite rectificar)*

Es una estrategia inteligente que intenta no gastar memoria. Avanza en profundidad, pero si se equivoca, vuelve sobre sus pasos.

- **Funcionamiento**:
  - Elige el mejor hijo disponible (usando la heurística para ordenar) y avanza.
  - **Gestión de memoria estricta**: Solo recuerda el **camino actual** (la ruta activa desde el inicio), no todo el árbol.
  - **Vuelta atrás**: Si llega a un "callejón sin salida" (punto muerto), retrocede al padre y prueba el siguiente hijo prometedor 2.
- **Utilidad**: Ideal cuando tienes muy poca memoria pero necesitas encontrar una solución, aunque no sea la más corta.

> **Nota**
>
> Si $f(n) = g(n)$ es una búsqueda no informada

Algoritmo de Escalada (Hill Climbing)

*Tipo: **Irrevocable** (Versión estricta del algoritmo ávaro)*

Es el ejemplo clásico de estrategia irrevocable. Busca la cima de la montaña dando siempre el paso que más sube, sin mirar atrás.

- **Estrategia**: Evalúa los vecinos y se mueve *inmediatamente* al que tiene mejor heurística (parece estar más cerca de la meta), **descartando y olvidando el resto**.

- **Función de evaluación**: $f(n) = h(n)$ (Solo importa lo que falta).
- **Riesgo**: Como no guarda la historia ni alternativas, puede quedarse atrapado en **máximos locales** (una pequeña colina que parece la cima pero no lo es) o **mesetas** (donde todos los pasos son iguales y no sabe a dónde ir).

Algoritmo A* (A-Estrella)

Tipo: ***Tentativa***
La más completa es la estrategia estrella porque equilibra la precaución con la eficiencia. Guarda alternativas (es tentativa) y evalúa el coste total.

- **Estrategia**: No solo mira cuán cerca parece estar la meta (h), sino cuánto le ha costado llegar hasta ahí (g).
- Función de evaluación:

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

  (Costo Total = Costo ya pagado + Costo estimado restante).
- **Propiedad Clave**: Si la heurística es **admisible** (nunca es pesimista, es decir, $h(n) \leq$ coste real), A* garantiza encontrar la solución **óptima** (la más barata/corta) y es **completa** (siempre encuentra solución).

> **Info**
>
> Una heurística admisible u optimista: siempre suponer casos en los que la realidad será peor que la estimación.
>
> **Si eres Pesimista (h > coste real):** Imagina que hay un atajo secreto que tarda 15 minutos. Pero tu heurística es pesimista y le dice al algoritmo: "Por ese callejón vas a tardar 1 hora".
>
> - **Consecuencia:** El algoritmo se asusta, ve un coste altísimo y **no explora ese camino**.
> - **Resultado:** Pierdes la oportunidad de encontrar el mejor camino (la solución óptima) porque tu estimación te engañó diciendo que era malo.
>
> **Si eres Optimista (h <= coste real):** Tu heurística le dice al algoritmo: "Por ese callejón parece que tardas solo 5 minutos".
>
> - **Consecuencia:** Como parece un camino barato, el algoritmo **lo explora**.
> - **Resultado:** Al entrar, se da cuenta de que en realidad son 15 minutos (la realidad es peor que la estimación, como dice tu nota), pero **al menos lo exploró**.
> - A* prefiere equivocarse pensando que un camino es "demasiado bueno" (porque así lo comprueba) que equivocarse pensando que es "demasiado malo" (porque entonces lo ignora y podría ser la solución).

En el caso del 8-puzzle se acostumbra a usar estas **heurísticas:**
Misplaced Tiles (Piezas Descolocadas): Es la más simple. Simplemente **cuentas cuántas fichas no están en su posición final**.

- **Cálculo:** Si la ficha '1' está en la casilla del '2', suma 1. Si la '2' está bien colocada, suma 0.
- **Ejemplo:** Si 5 fichas están mal puestas, $h(n) = 5$

Distancia de Hamming: En el contexto del 8-puzzle, es **sinónimo de "Misplaced Tiles"**.

- Proviene de la teoría de la información (número de posiciones en las que dos cadenas de símbolos difieren). Aquí compara el "estado actual" con el "estado meta" y cuenta las diferencias.

Distancia de Manhattan (City Block): Es más precisa (y más informada) que la anterior.

- **Cálculo:** Para cada ficha, calculas cuántas casillas debe moverse (horizontal + vertical) para llegar a su destino. Luego **sumas todas esas distancias**.
- **Por qué se llama así:** Porque simula moverse por las calles de Manhattan (en cuadrícula), no puedes ir en diagonal.
- *Ejemplo:* Si la ficha '1' está a 2 casillas a la derecha y 1 abajo de su meta, su distancia es 3.

Heurística de Gaschnig: es una **relajación** del problema. Asume que puedes mover cualquier ficha a la posición del hueco (teletransportándola), no solo las adyacentes.

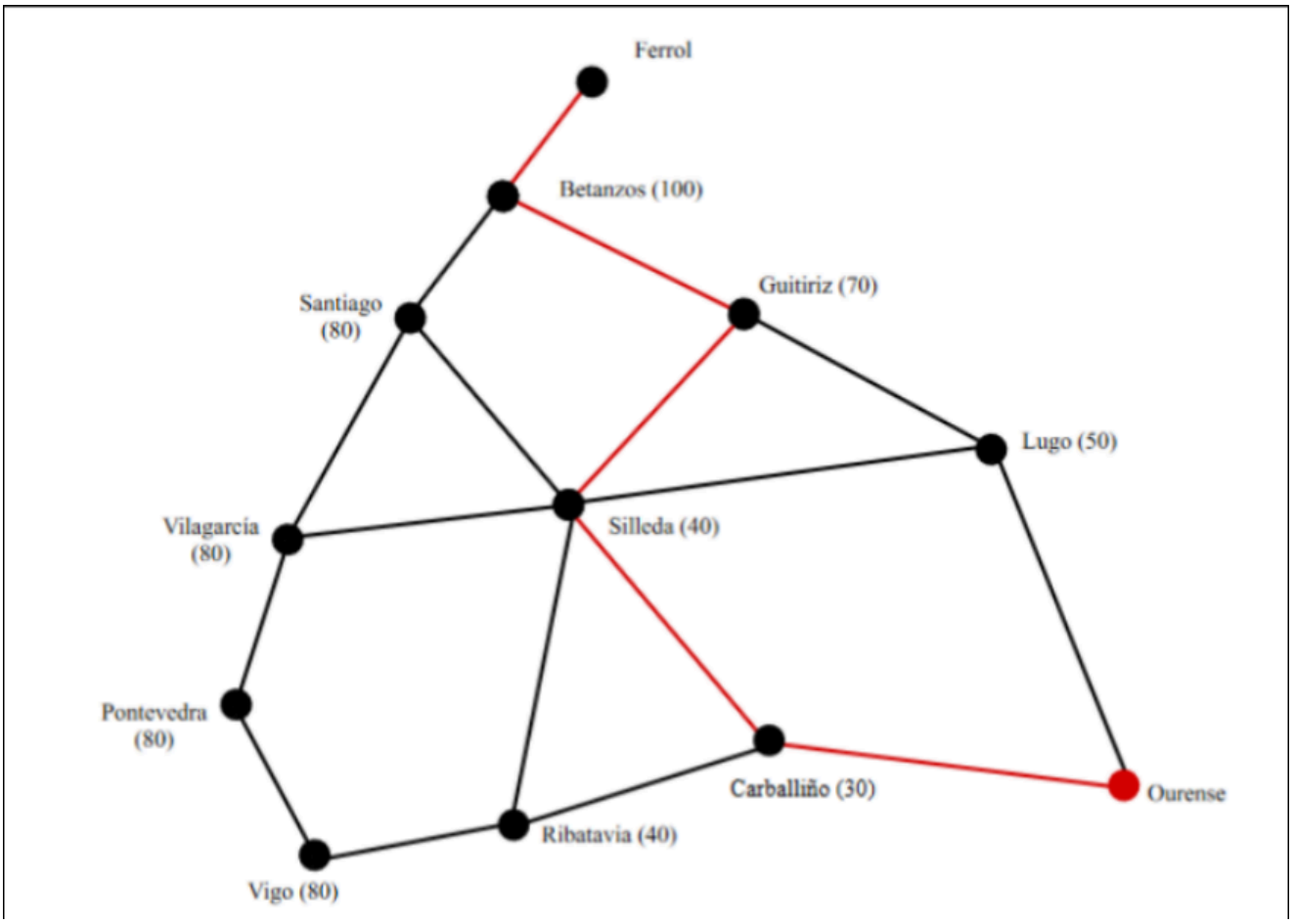
- **Cálculo:** Cuenta el número de intercambios necesarios para resolver el puzle si pudieras intercambiar el hueco con **cualquier** ficha del tablero para ponerla en su sitio de un solo movimiento.
- Suele dar un valor entre la de Hamming y la real.

2.3 Caso de Estudio Práctico: Ruta en Ciudades Gallegas

Este caso ilustra la diferencia entre ser "miope" (Voraz) y ser "inteligente" (A*).

El Problema: Ir de Ferrol a Ourense

- $g(n)$: Distancia real por carretera (tramos negros en el mapa)
- $h(n)$: Distancia en línea recta a Ourense (números rojos en paréntesis)



A. Ejecución Búsqueda Voraz ($f = h$)

Solo mira la distancia recta a la meta.

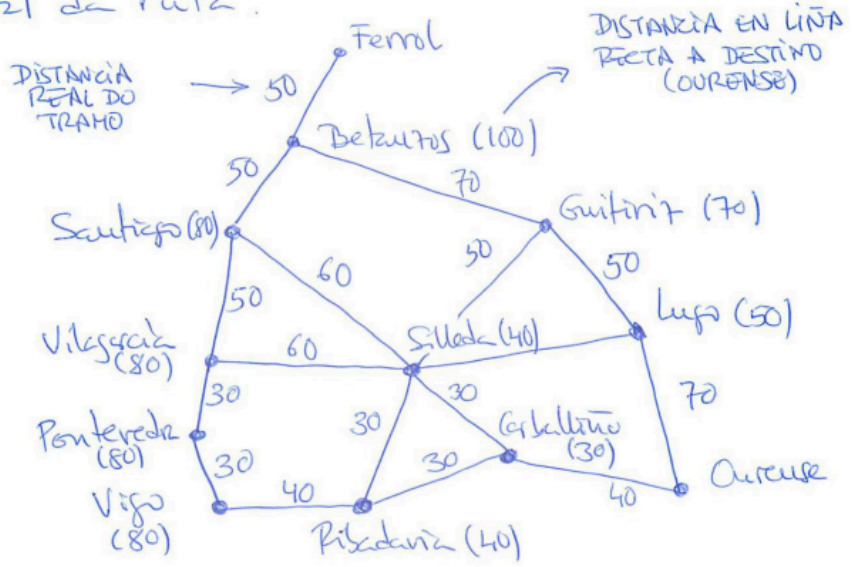
1. Ferrol va a Betanzos
2. Betanzos tiene vecinos: Santiago ($h = 80$) y Guitiriz ($h = 70$)
3. **Decisión**: Elige Guitiriz porque $70 < 80$ (parece más cerca)
4. **Resultado**: Termina encontrando una ruta de 240 km. **No es la mejor**.

B. Ejecución Búsqueda A* ($f = g + h$)

Mira el pasado (g) y el futuro (h).

1. Ferrol va a Betanzos ($g = 50$)
2. En Betanzos, evalúa opciones:
   - Ruta por Guitiriz: $g(50 + 70) + h(70) = 120 + 70 = 190$
   - Ruta por Santiago: $g(50 + 50) + h(80) = 100 + 80 = 180$
3. **Decisión**: Elige Santiago porque $180 < 190$. Aunque Santiago parece más lejos en línea recta, el costo total estimado es menor.
4. **Resultado**: Encuentra la ruta óptima de 230 km pasando por Santiago y Silleda.

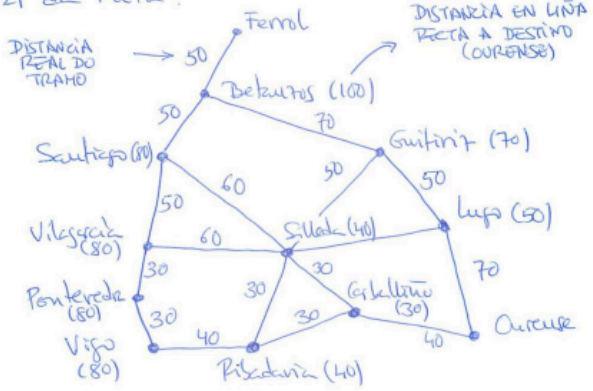
Problema:
Ir de Ferrol a Ourense minimizando a distancia total da ruta.



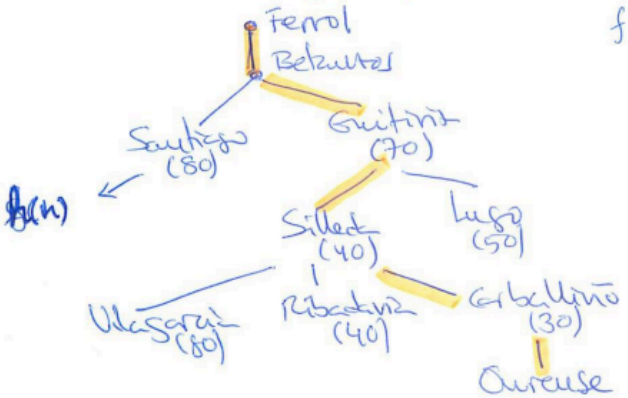
$f(n) = g(n) + h(n)$

- $g(n)$: Distancia real desde orixe (Ferrol)
- $h(n)$: Distancia en liña recta ata destino (Ourense)

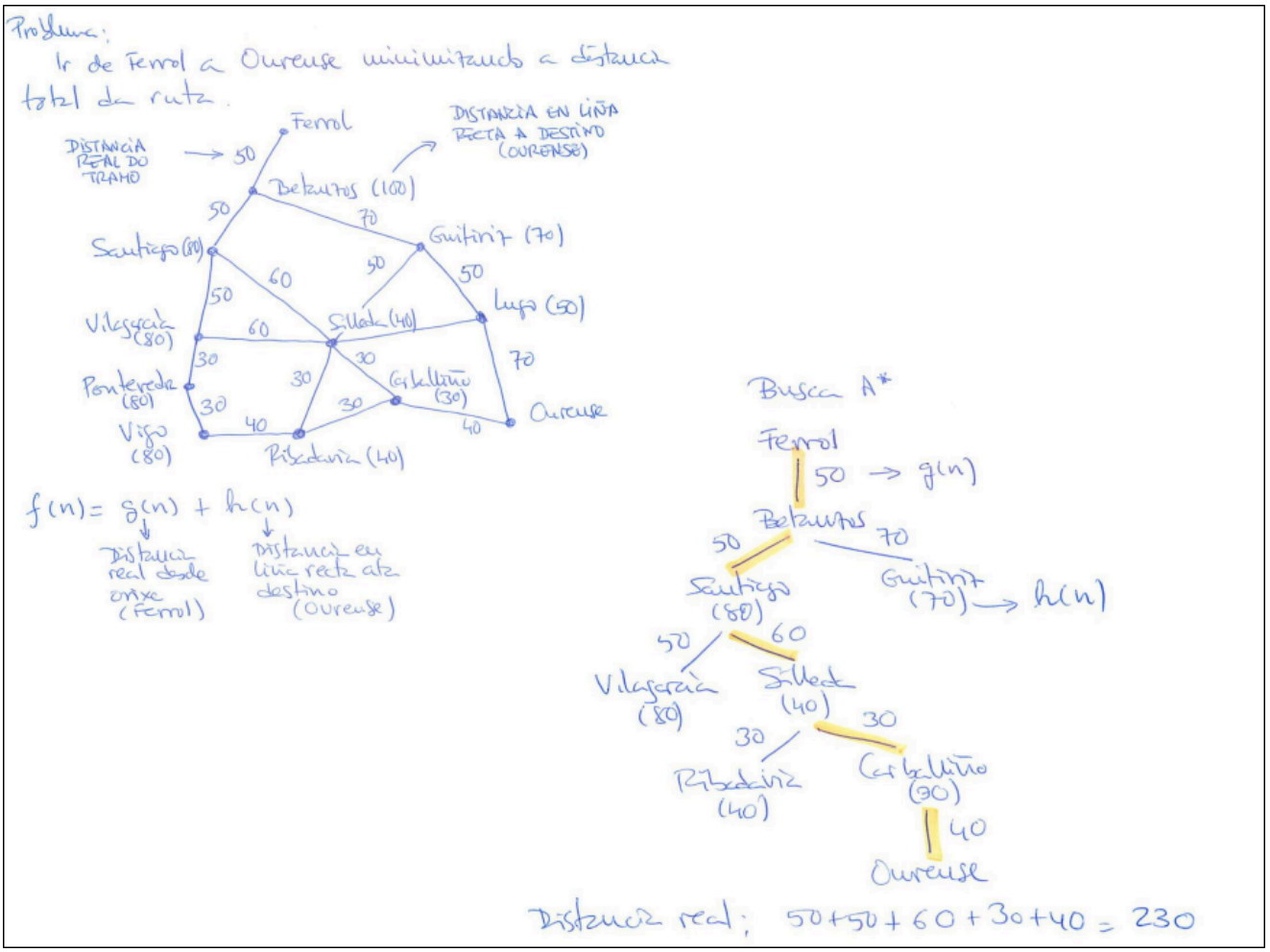
Problema:
Ir de Ferrol a Ourense minimizando a distancia total da ruta.



Busca avara $g(n) = \emptyset$



Distancia real: $50 + 70 + 50 + 30 + 40 = 240$



2.4 Destellos de calidad del Senén en clase

2.4.1 ¿Qué es el Problema del Viajante de Comercio (TSP)?

Imagina que eres un repartidor de Amazon.

- Tienes una lista de **100 ciudades** que visitar.
- Sales de la central (digamos, la ciudad 0).
- **Reglas:** Tienes que visitar todas las ciudades **una sola vez** y volver al punto de partida.
- **Objetivo:** Encontrar la ruta más corta posible para ahorrar gasolina.

Esto es el **TSP (Traveling Salesperson Problem)**. En informática es famoso porque es muy difícil de resolver perfectamente cuando hay muchas ciudades, ya que el número de combinaciones posibles es gigantesco.

2.4.2 ¿Qué es el "Tamaño del Espacio de Búsqueda"?

Es una forma técnica de preguntar: **"¿Cuántas rutas distintas posibles existen en total en el universo?"**. Para calcularlo en este problema (100 ciudades, empezando en la 0), usamos matemáticas de combinatoria (permutaciones):

1. La **Ciudad 0** está fija al principio y al final. No la puedes mover.

2. Te quedan **99** ciudades libres para barajar.
3. El número de formas de ordenar esas 99 ciudades es:
   $99 \times 98 \times 97 \times \ldots \times 1 = 99!$

Este número es inmensamente grande (mayor que el número de átomos en el universo). Por eso es imposible probarlas todas una por una.

2.4.3 ¿Qué es el Entorno (Contorna) y su Tamaño?

Aquí es donde entra la confusión habitual. Si el "Espacio de Búsqueda" es toda la biblioteca, el **Entorno** son solo **los libros que puedes alcanzar con la mano sin moverte**. Los algoritmos de búsqueda local (como Escalada o Tabú) no ven todo el espacio a la vez. Funcionan paso a paso modificando la ruta actual.

- **Definición:** El entorno es el conjunto de **todas las rutas "vecinas"** que puedes generar aplicando **un solo operador** a tu ruta actual.
- **El Operador:** Normalmente usamos el "intercambio de dos ciudades" (swap).

Cálculo del Tamaño del Entorno (N): La pregunta es: *"¿Cuántas parejas de ciudades puedo elegir para intercambiar?"*.

1. Tenemos **99 ciudades** móviles (recuerda: la ciudad 0 es fija, esa no se toca).
2. El operador elige **2** de ellas para cambiarlas de sitio.
3. Matemáticamente es una **combinación sin repetición**:
   $N = \frac{99 \times 98}{2}$
   que
   Diferencia Clave:

- **Espacio de Búsqueda (99!):** Todas las soluciones que existen.
- **Entorno (≈4851):** Las opciones que tiene el algoritmo *en cada paso* para decidir hacia dónde moverse.

2.4.4 ¿Qué es la Búsqueda Tabú?

Es una **estrategia** inteligente para moverse por ese entorno sin atascarse.

- El algoritmo genera el entorno (las 4851 opciones vecinas).
- Elige la mejor opción para moverse.
- **El problema:** Podría quedarse atrapado haciendo y deshaciendo el mismo cambio (ej: cambiar Madrid-Barna y luego Barna-Madrid).
- **La solución (Tabú):** Tiene una "memoria" de los últimos cambios.
- **La regla:** "Si acabo de probar este cambio, está **prohibido (tabú)** volver a hacerlo o deshacerlo durante un número X de turnos".

Nota para el examen: Usar Búsqueda Tabú **NO cambia el tamaño del espacio de búsqueda** (99! sigue siendo 99!). Lo que hace es guiar *qué partes* de ese espacio

exploramos para no perder tiempo en círculos, por lo que el contorno inicial es más grande que el resto.