

# Metagenómica

---

## Resumen

La metagenómica es el estudio de la estructura y función de todas las secuencias de nucleótidos aisladas y analizadas de todos los organismos (habitualmente microbios) en una muestra a granel ambiental. Forma parte de las ciencias ómicas, conociéndose como genómica ambiental, ecogenómica o genómica de la comunidad.

# Índice general

<b>I</b>	<b>Introducción a la metagenómica</b>	<b>2</b>
I.1	Importancia de la microbiología . . . . .	2
I.1.1	Conceptos clave: microbiota, microbioma y metagenoma . . . . .	3
I.2	Metagenómica . . . . .	3
I.2.1	Genómica vs metagenómica . . . . .	4
I.2.2	Ribosoma como reloj evolutivo . . . . .	5
I.3	Aplicaciones de la metagenómica . . . . .	6
I.4	Conclusiones . . . . .	7
<b>II</b>	<b>Análisis de poblaciones ambientales mediante genes marcadores</b>	<b>8</b>
II.1	Análisis del microbioma mediante metabarcoding - Perfil de las comunidades 16S . . . . .	8
II.1.1	Herramientas para el análisis de metabarcoding . . . . .	8
II.1.2	Flujo de trabajo básico en metabarcoding . . . . .	9
II.1.3	Unidades taxonómicas operativas (OTUs) y Variantes de secuencia de Amplicones (ASVs) . . . . .	10
II.1.4	Consideraciones importantes . . . . .	11

# Capítulo I

## Introducción a la metagenómica

### I.1. Importancia de la microbiología

Los microorganismos desempeñan un papel crucial en la biosfera debido a su participación en el reciclaje de recursos en los ciclos biogeoquímicos y su influencia en eventos histórico-globales, como la primera extinción masiva del planeta ( $O_2$ ). Sólo las cianobacterias son responsables de 1/2 de la actividad fotosintética del planeta.

A nivel aplicado, su relevancia es evidente en campos como: la medicina, por su capacidad patogénica, o la agricultura, donde una población microbiana (bacterias, hongos, etc.) equilibrada y sana en el (ecosistema que constituye el) suelo es fundamental para el crecimiento saludable de las plantas (como nosotros con los probióticos y los bífidos). La optimización de cultivos agrícolas puede lograrse mediante la modulación de las relaciones microbianas. Lo que permite reducir la dependencia de agroquímicos, cuyo uso excesivo hipersaliniza el suelo, genera toxicidad y contaminan gran parte de los cuerpos acuíferos.

Los microorganismos también se pueden aplicar en otras tareas como la biorremediación, donde se emplean para restaurar ecosistemas contaminados por hidrocarburos, metales pesados y otros contaminantes. También se explora la producción de biocombustibles a partir de biomasa para reducir la dependencia en los hidrocarburos. Estos ejemplos ilustran solo algunas de las aplicaciones prácticas de la microbiología.

En el cuerpo humano, las bacterias superan  $10^1$  en número a las células propias y constituyen aproximadamente 2 kg de biomasa. Estos albergan alrededor de 3.3 millones de genes, distribuidos en más de 1000 spp. de bacterias (estudio de 2010), que exceden por mucho los de nuestro genoma (240K genes). Alteraciones en la microbiota, como el desequilibrio entre *Firmicutes* y *Bacteroidetes*, pueden afectar el metabolismo de nutrientes y contribuir a condiciones como la obesidad, como se ha demostrado en estudios con ratones.

Queremos caracterizar e identificar estas comunidades microbianas, sin embargo, caracterizar microorganismos no es sencillo. La aproximación clásica, basada en el cultivo (axénico) y observación microscópica, es limitada, ya que muchas bacterias no son cultivables en laboratorio. Este fenómeno, conocido como la "anomalía del recuento en placa", implica que solo el 15-35 % de la microbiota puede cultivarse

(desconocemos sus condiciones de crecimiento o estos son mutualistas obligados). Por lo que no podemos cubrir la diversidad ni saber todo lo que están haciendo dentro de nuestro organismo. Esto ha llevado al desarrollo de la metagenómica, que permite estudiar comunidades microbianas directamente en su entorno natural sin necesidad de cultivo.

### I.1.1. Conceptos clave: microbiota, microbioma y metagenoma

- **Microbiota:** Conjunto de microorganismos presentes en un entorno específico (punto de extracción), como el colon o la cavidad bucal, cada uno con una composición característica.
- **Microbioma:** Genoma colectivo de una microbiota, es decir, la suma de los genomas de todos los microorganismos presentes. Este término fue acuñado por Hooper y Gordon en 2001. Entiéndase que si consiguiéramos conocer nuestro microbioma, ¡podríamos saber las rutas metabólicas e inferir las condiciones de crecimiento de la microbiota de cada individuo (persona)!
- **Metagenoma:** es visualmente... "el completo": la suma de cada genoma individual de cada individuo. Es un concepto reciente nacido de la limitación de los anteriores. La metagenómica es por definición: el conjunto de técnicas (y avances) de biología molecular que permiten analizar y discernir el microbioma sin necesidad de cultivarlo.

## I.2. Metagenómica

La **metagenómica**, definida en (K.Chen & L. Pachter, 2005), aplica técnicas genómicas modernas para estudiar comunidades microbianas en su entorno natural, evitando la necesidad de aislar y cultivar especies individuales. No debe confundirse con el *metabarcoding* o metagenómica funcional, que utiliza genes marcadores<sup>1</sup> específicos que permiten discernir los distintos individuos en una población. El metagenoma contiene toda la información del microbioma, pudiendo tener acceso a las rutas metabólicas y las condiciones de crecimiento. De hecho, la Wikipedia abarca esa definición, pero también comprende el análisis mediante genes marcadores, pero esto no está estrictamente incluido y es una incorrección; la metagenómica es solo para (meta)genomas completos, mientras que la secuenciación de amplicones es para marcadores específicos.

---

<sup>1</sup>Un gen marcador es un gen que aparece en todos los genomas de una población (o en la parte de la población que nos interese) y cuya evolución de cada gen en cada individuo debe permitir discernir a los individuos entre sí. En resumen, debe estar conservado y presentar pequeñas diferencias. Así, se pueden taggear los distintos individuos.

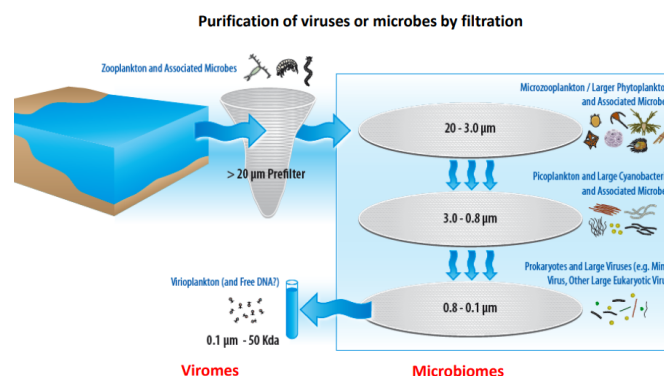
### 1.2.1. Genómica vs metagenómica

La genómica tradicional requiere el aislamiento y amplificación del genoma de organismos individuales, pero conlleva la pérdida de una gran parte de la población microbiana. En contraste, la metagenómica permite el aislamiento y ensamblaje directo de genomas en contigs, aunque con el riesgo de generar quimeras (genomas que sean mezclas de varios individuos).

La metagenómica no solo se limita a caracterizar la composición microbiana, sino que también busca entender su funcionalidad. Esto incluye la identificación de rutas metabólicas y actividades enzimáticas, lo que es aplicable tanto a bacterias como a hongos. Para ello, pueden utilizarse técnicas como librerías de expresión metagenómicas (analizar un tipo de expresión génica que nos interese, p.ej: la actividad nitrogenasa) o herramientas bioinformáticas: se ensambla el metagenoma y con BLAST se buscan los genes de interés en los contigs. Los resultados de esta segunda ruta deben contrastarse experimentalmente clonando (PCR) y amplificando -> para análisis funcional. No obstante, para ello hay que buscar secuencias concretas de las que se conoce su funcionalidad, pero esto es un proceso lento. Además, algunos organismos pueden haber desarrollado otra secuencia a través de una línea de evolución diferente con una funcionalidad similar, pero que no es conocida (sesgo). Los métodos tradicionales, como la PCR y la clonación, son laboriosos y lentos. Hoy en día, las tecnologías ómicas (metagenómica, metatranscriptómica, metaproteómica y metametabolómica) permiten un análisis/ caracterización más rápido y completo de las comunidades microbianas, de sus hábitats y de sus interacciones/ relaciones ecológicas.

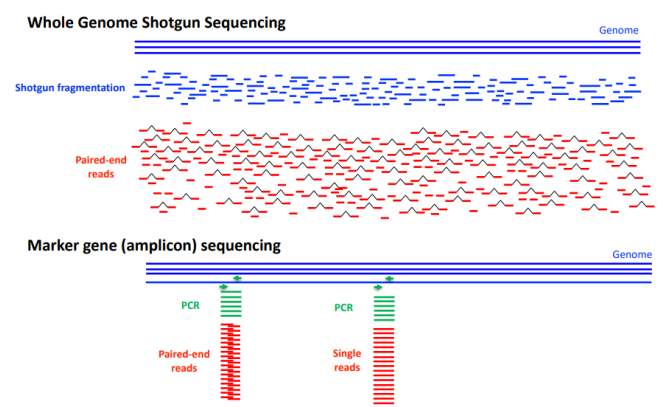
Los procesos en metagenómica son los siguientes:

1. **Diseño experimental y muestreo:** Es crucial seleccionar muestras biológicas adecuadas y diseñar experimentos que permitan obtener resultados representativos. Las muestras pueden provenir de agua, suelo o tejidos humanos, y cada tipo requiere protocolos específicos. Por ejemplo, en el caso de una columna de agua extraída del mar, se pueden utilizar filtros de distinto tamaño, y nos quedamos con el filtro adecuado en función de lo que se desea estudiar. En el caso de bacterias, filtros de 8-9 micras. Y en el caso de cianobacterias y sus microorganismos asociados, de 3 a 8 micras.



2. **Extracción y secuenciación del ADN:** Una vez obtenida la muestra, se extrae el ADN y se prepara para la secuenciación, ya sea mediante fragmentación o amplificación de genes marcadores (como el 16S rRNA).

3. **Ensamblaje y anotación:** Los fragmentos de ADN se ensamblan en contigs, que luego se comparan con bases de datos para identificar genes y asignar taxonomía. Sin embargo, solo se reconstruye alrededor del 50 % del metagenoma debido a la presencia de genes desconocidos (no se sabe anotar la mitad de las lecturas). Además, se utilizan umbrales que descartan contigs de menos de 1000 pares de bases, pudiendo descartar poblaciones minoritarias. Esto se puede salvar utilizando metabarcoding secuenciando un gen (por ejemplo, el gen 16S de la subunidad pequeña del ribosoma) para que las poblaciones minoritarias sí encuentren representación. No obstante, hay que tener en cuenta que con un fragmento tan pequeño no es tan fácil discernir la especie.

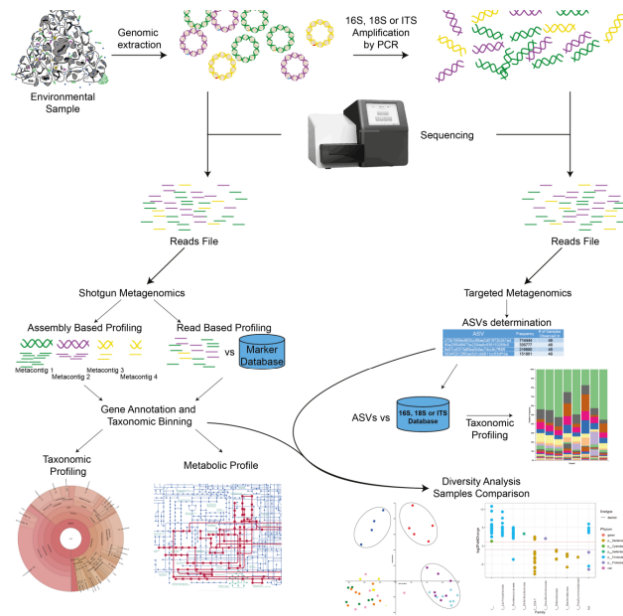


4. **Análisis de diversidad y funcional:** Se utilizan herramientas bioinformáticas para analizar la diversidad microbiana y las rutas metabólicas presentes en un individuo. Esto incluye la creación de perfiles taxonómicos y funcionales. Esto sirve, por ejemplo, para comparar la diversidad microbiana bajo una condición experimental con fármaco. Se ha multiplicado exponencialmente la cantidad de artículos relacionados con el metagenoma y la cantidad de datos en las bases de datos. De hecho, cuando se publican los datos, una de las primeras cosas que piden es subirlo a repositorios como MGnify, MG-Rast, HMP, NCBI-SRA, Metavir, etc. En ellas se explica cómo procesar los datos y clasificarlos para facilitar su posterior búsqueda.

### I.2.2. Ribosoma como reloj evolutivo

El ribosoma se ha conocido tradicionalmente como el reloj evolutivo, al ser la maquinaria que permite la traducción del ARNm a proteína. Si hay errores en el ribosoma, la mutación es deletérea, al haber una gran presión evolutiva en el ribosoma. Pero no es constante, se pueden admitir pequeñas variaciones, las cuales se pueden utilizar para discernir los distintos grupos taxonómicos.

El ARN ribosomal está presente en todos los organismos vivos, y está conservado al tener un papel crucial. Además, se utiliza para generar un árbol filogenético de todas las especies. Esto sirvió para ver que los ribosomas humanos se parecen más a las arqueas que a las bacterias. Y se encontró que el 33 % de la diversidad del árbol corresponde con individuos nuevos que no se habían caracterizado, denominados CPR (*Candidate Phyla Radiation*), con un papel bastante crucial para el establecimiento de poblaciones.

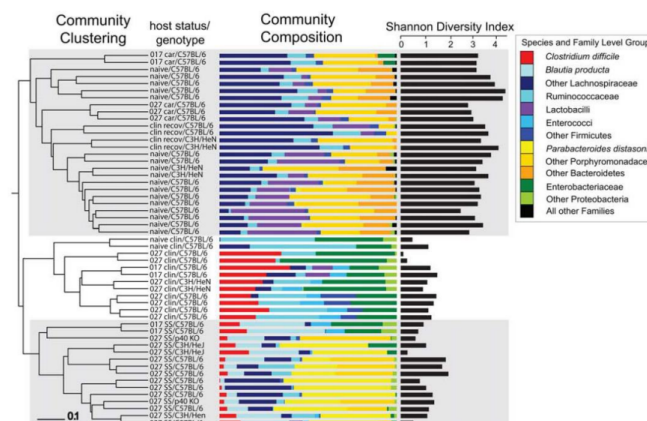


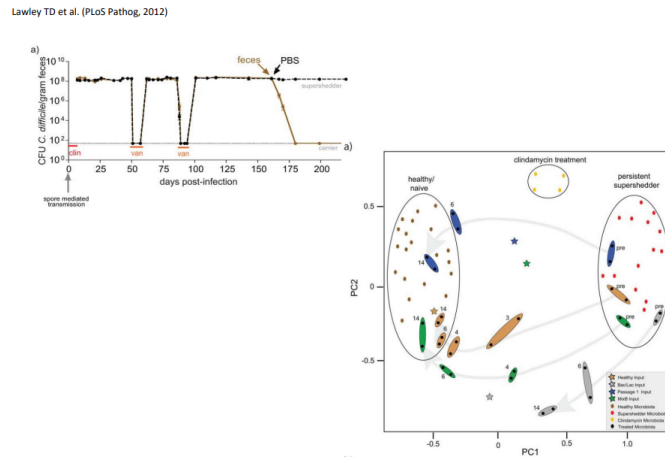
### 1.3. Aplicaciones de la metagenómica

La metagenómica ha revolucionado el estudio de la microbiota humana y de los ecosistemas. Proyectos como el **Human Microbiome Project** buscan caracterizar el microbioma humano en diferentes condiciones y localizaciones, identificando correlaciones entre la composición microbiana y enfermedades como la obesidad, la psoriasis y las enfermedades cardiovasculares. A este conjunto de enfermedades se le conoce como **disbiosis**, patologías causadas por desregulaciones de las poblaciones microbianas. No se conoce si se provoca primero la enfermedad y en base al microclima cambia también la microbiota o al revés, pero la caracterización del microbiota sirve como marcador de estas enfermedades.

Un ejemplo destacado es el tratamiento de infecciones por *Clostridium difficile* mediante trasplantes de microbiota fecal, que han demostrado restaurar la diversidad microbiana y mejorar la salud del paciente. Se utiliza el índice de Shannon como índice de diversidad (se ve disminuido en el sobrecrecimiento de *Clostridium difficile* y aumentado con el trasplante).

Lawley TD et al. (PLoS Pathog. 2012)





## 1.4. Conclusiones

La metagenómica es una herramienta poderosa para estudiar comunidades microbianas en su entorno natural, superando las limitaciones de los métodos tradicionales. Su aplicación abarca desde la agricultura y la biorremediación hasta la medicina, ofreciendo insights valiosos sobre la diversidad y funcionalidad de los microorganismos. Sin embargo, su éxito depende de un diseño experimental riguroso y del uso adecuado de herramientas bioinformáticas para interpretar los datos generados.



## Capítulo II

# Análisis de poblaciones ambientales mediante genes marcadores

### II.1. Análisis del microbioma mediante metabarcoding - Perfil de las comunidades 16S

El objetivo del metabarcoding es utilizar un gen marcador para caracterizar y cuantificar los miembros de una comunidad microbiana compleja, permitiendo comparar comunidades y evaluar su similitud o disimilitud. El gen marcador más utilizado es la subunidad 16S del ARN ribosomal, debido a su conservación evolutiva y su utilidad como estimador filogenético. Las mutaciones en este gen suelen ser deletéreas, ya que afectan la estructura y función del ribosoma. Sin embargo, ciertas regiones del gen 16S permiten variaciones, lo que las convierte en marcadores ideales para estudios filogenéticos.

El gen 16S completo tiene aproximadamente 1.500 nucleótidos, pero su secuenciación completa solo es posible con tecnologías como Oxford Nanopore y PacBio, que son más costosas y menos eficientes para estudios de diversidad. Por ello, se suelen amplificar y secuenciar regiones hipervariables (como V3-V4 o V4-V5), que son más cortas y adecuadas para plataformas como Illumina. Estas regiones se seleccionan en función del organismo o entorno estudiado. Por ejemplo, en plantas, donde el ADN mitocondrial y cloroplástico puede interferir, se utilizan cebadores específicos (como V3-V5) o se aplican filtros previos para evitar contaminación.

#### II.1.1. Herramientas para el análisis de metabarcoding

Existen varias herramientas bioinformáticas para analizar secuencias de metabarcoding, como **Mothur** y **QIIME2**, que ofrecen flujos de trabajo similares pero en entornos distintos (como Microsoft Word vs Google Docs). Ambas utilizan algoritmos como **vsearch** o **DADA2** para determinar la diversidad bacteriana. Estos algoritmos, implementados en R, también pueden usarse directamente mediante scripts personalizados. Otros paquetes útiles incluyen:

- **Phyloseq:** Permite almacenar secuencias junto con metadatos para comparar secuencias.
- **Vegan:** Facilita estudios de diversidad.
- **Microbiome:** Combina funcionalidades de Phyloseq y Vegan para analizar diferencias entre poblaciones.
- **Phangorn:** Utilizado para calcular árboles filogenéticos.

### II.1.2. Flujo de trabajo básico en metabarcoding

**Importar datos** Para analizar las lecturas, se necesita un **archivo de metadatos**, que es un archivo de texto tabular donde la primera columna identifica las muestras y las siguientes contienen descriptores relevantes (como condiciones experimentales). Es crucial asegurarse de que el formato del archivo sea correcto, especialmente en Windows, donde los saltos de línea deben ser de un solo bit (LF en lugar de CRLF).

**Demultiplexado** El primer paso en el flujo de trabajo es separar las lecturas crudas del secuenciador según la muestra a la que pertenecen. Este proceso, llamado demultiplexado, genera archivos individuales para cada muestra.

**Denoising y Clustering** Las lecturas demultiplexadas pueden contener errores de secuenciación. El proceso de denoising elimina estos errores, mientras que el clustering agrupa las secuencias biológicamente significativas. El resultado es una tabla de abundancias (feature table), que muestra la frecuencia de cada secuencia en cada muestra, y un archivo FASTA con las secuencias representativas. Con estos datos, se pueden realizar análisis posteriores, como:

- Asignación taxonómica en los 7 niveles.
- Alineación de secuencias para establecer relaciones filogenéticas.
- Estimación de diversidad y abundancia diferencial.
- Representaciones gráficas (heatmaps, PCA, etc.).
- Análisis estadístico.

Entre los factores a tener en cuenta está la calidad de las lecturas. Illumina tiene una plataforma de secuenciación (novaseq) que no se recomienda para estos estudios. Esto se debe a que está parametrizado por inteligencia artificial, y para 16S se requieren valores continuos no parametrizados.

En cuanto al denoising y clustering en detalle, se pueden diferenciar los siguientes pasos:

1. **Eliminación de adaptadores:** Se utilizan herramientas como Cutadapt para eliminar adaptadores de secuenciación (Illumina) y de PCR. Las plataformas de secuenciación suelen eliminar solo los adaptadores propios, por lo que este paso es esencial.

2. **Filtrado de calidad:** Se analiza la calidad de las lecturas y se filtran aquellas que no cumplen con los estándares requeridos.
3. **Clustering:** Se agrupan las secuencias en función de su homología. Algoritmos como vsearch, DADA2 o Deblur se utilizan para este fin. El resultado es una tabla de frecuencias y un archivo FASTA con las secuencias representativas.
4. **Eliminación de Singletons y Raretons:** Las secuencias que aparecen una sola vez (singletons) o en baja frecuencia (raretons) se eliminan, ya que suelen ser artefactos. Sin embargo, esto puede llevar a la pérdida de poblaciones minoritarias, por lo que debe hacerse con precaución.
5. **Detección de quimeras:** Las quimeras son secuencias artificiales generadas durante la PCR, donde dos o más secuencias biológicas se fusionan (normalmente cuando la fase de elongación es incompleta). Se detectan comparando las secuencias más abundantes y eliminando aquellas que parecen ser mezclas.

### II.1.3. Unidades taxonómicas operativas (OTUs) y Variantes de secuencia de Amplicones (ASVs)

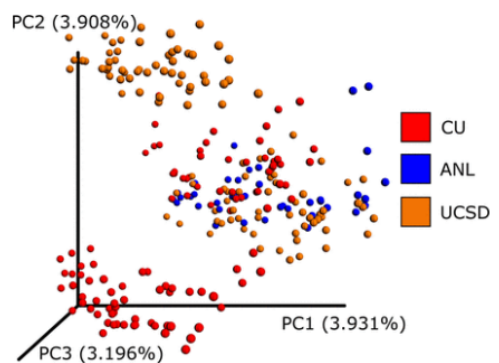
#### II.1.3.1. OTUs (Operational Taxonomic Units)

Las OTUs son grupos de secuencias con una homología superior al 97 %, lo que permite agrupar secuencias similares en una única unidad taxonómica. Existen tres estrategias principales para asignar OTUs:

- **OTUs de novo:** Las secuencias se comparan entre sí sin utilizar una base de datos externa. Es útil cuando no hay referencias disponibles, pero es computacionalmente costoso. Esto no es conveniente cuando los amplicones no solapan, pero la ventaja es que todas las lecturas van a ser clasificadas, incluidas aquellas desconocidas que no cuentan con una referencia externa.
- **OTUs de referencia cerrada:** Las secuencias se comparan con una base de datos, por lo que sí se pueden utilizar amplicones grandes. Es más rápido, pero las secuencias no encontradas en la base de datos se descartan.
- **OTUs de referencia abierta:** Combina las dos estrategias anteriores. Primero se compara con una base de datos, y las secuencias no identificadas se agrupan de novo. Esta estrategia tiene todas las ventajas y desventajas de las anteriores: no se pueden usar amplicones largos (para aquellas secuencias que no aparezcan en la base de datos), se depende de una base de datos, pero todas las lecturas serán asignadas y a una velocidad más rápida.

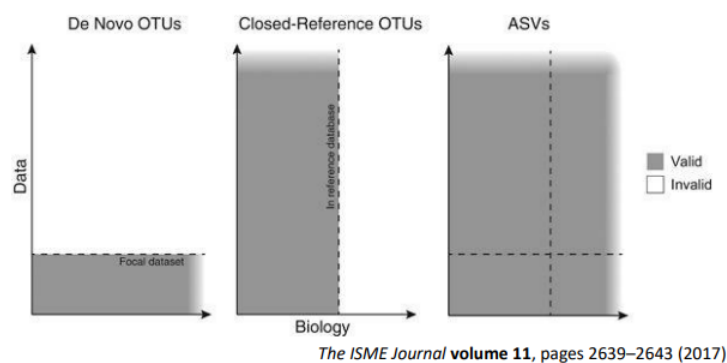
El umbral del 97 % se ha utilizado clásicamente considerando que las lecturas pueden mostrar una probabilidad de error de al menos el 0,1 % por nucleótido. La estrategia de agrupación de OTU reduce ese problema. No obstante, no podemos comparar secuencias de varios experimentos, ya que la OTU (centroide) se calcula cada vez. La secuencia centroide es la secuencia representativa (consenso del alineamiento) que se va a ir modificando conforme se van añadiendo más secuencias miembro al

clúster. Las agrupaciones cambian en función del orden de las secuencias durante la comparación. Sólo son comparables los ensayos que utilizan las estrategias de referencia cerrada y de referencia abierta, aunque existen diferencias.



### II.1.3.2. ASVs (Amplicon Sequence Variants)

Las ASVs superan las limitaciones de las OTUs al capturar toda la variación biológica presente en los datos. A diferencia de las OTUs, las ASVs son reproducibles y comparables entre conjuntos de datos, lo que las hace más robustas para estudios a largo plazo.



### II.1.3.3. sOTUs

Los Sub-Operational Taxonomic Units (sOTUs) son un enfoque que busca alcanzar una resolución a nivel de nucleótido único mediante métodos estadísticos avanzados. A diferencia de las OTUs tradicionales, que agrupan secuencias con una similitud del 97 %, los sOTUs inferen las secuencias únicas reales trabajando con cada muestra por separado y utilizando distancias de Hamming (que miden las diferencias entre secuencias a nivel de nucleótidos). Este método permite una mayor precisión en la identificación de variantes microbianas.

Sin embargo, este enfoque tiene un costo: se pierden aproximadamente el 50 % de las lecturas debido al filtrado exhaustivo que aplica. A pesar de esto, la resolución obtenida es comparable o incluso superior a la de las OTUs tradicionales. Al igual que en otros métodos, es esencial detectar y eliminar quimeras, que se identifican a partir de las secuencias más abundantes. Los algoritmos más utilizados para este fin son Deblur y DADA2, que han demostrado ser eficaces en la inferencia de sOTUs.

#### II.1.4. Consideraciones importantes

**Correspondencia entre OTUs y especies** No se puede asumir una correspondencia directa 1:1 entre las OTUs (o sOTUs) y las especies en una población microbiana. Esto se debe a varias razones:

- Una misma especie puede tener múltiples copias del gen 16S, las cuales no son idénticas debido a variaciones naturales o transferencia horizontal de genes.
- En el mejor de los casos, una OTU puede corresponder a una copia específica del gen 16S, pero no necesariamente a una especie única.

**Sesgos experimentales** Los resultados pueden verse afectados por errores experimentales, como:

- **Errores de secuenciación:** Las plataformas de secuenciación no son perfectas y pueden introducir errores en las lecturas.
- **Artefactos de PCR:** Durante la amplificación, pueden generarse quimeras o sesgos en la representación de ciertas secuencias.

Estos factores deben tenerse en cuenta al interpretar los resultados, ya que pueden afectar la precisión y la fiabilidad de los análisis de diversidad microbiana.