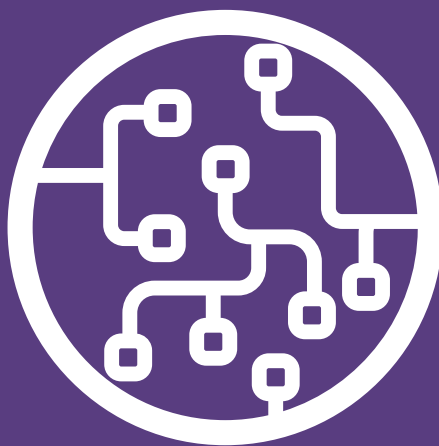


Titulo por definir



Jacqueline Aldridge Águila

UMA

Titulo por definir

Jacqueline Aldridge Águila

Dirigida por

Dr. Roberto Uribe-Paredes

Tesis para optar al grado de

Magíster en Bioinformática

Departamento de Ingeniería en Computación

Facultad de Ingeniería

Universidad de Magallanes

Julio, 2024

Índice general

Declaración de Autenticidad	II
Agradecimientos	III
1 Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Descripción del documento	1
1.4. Motivación	1
2 Marco teórico y estado del arte	2
2.1. Gen 16S para el estudio de comunidades microbioanas / Estudio de microbiota a traves del gen 16S y tecnologías de secuenciacion	2
2.2. Herramientas	7
3 Flujo de trabajo y Aplicación Web	14
3.1. Flujo de trabajo	15
3.2. Base de datos	18
3.3. Aplicación Web	20
4 Discusión	25
Bibliografía	26

Declaración de Autenticidad

P



UMAG
Universidad de Magallanes

Declaro que la presente tesis y el trabajo presentado en ella son de mi propia autoría. Basado en mi comprensión y conocimiento, puedo afirmar que este trabajo es original y, en aquellos casos donde se han desarrollado ideas en colaboración con otras personas, se han realizado las citas y referencias apropiadas para reconocer dichas contribuciones. Finalmente, confirmo que este trabajo no ha sido presentado para ningún otro grado o calificación académica.

Título Título por definir
Autor Jacqueline Aldridge Águila
Grado Magíster en Bioinformática
Facultad Facultad de Ingeniería

Fecha Julio, 2024

Agradecimientos

P

agradecimientos

1

Introducción

1.1 | Introducción

1.2 | Objetivos

Objetivo general

Objetivos específicos

1.3 | Descripción del documento

1.4 | Motivación

Marco teórico y estado del arte

Esta tesis busca presentar una nueva alternativa para la caracterización de comunidades microbianas utilizando secuenciación de tercera generación. Para ello se desarrolló un flujo de trabajo automatizado que permite realizar el procesamiento de los datos de secuenciación, control de calidad, asignación taxonómica, análisis de diversidad, predicción funcional y caracterización de grupos. Se desarrolló también una aplicación web que ejecuta el flujo de trabajo y presenta los resultados en forma de gráficos y tablas en la plataforma. Para usar la plataforma el usuario debe llenar un formulario con la metadata de la secuenciación, subir los archivos e indicar los análisis a realizar, con esto la plataforma web enviará los datos de secuenciación a la plataforma de alto rendimiento y ejecutará el flujo de trabajo, una vez finalizado, los resultados se presentarán en la plataforma web.

A continuación se presenta el marco teórico y estado del arte de los conceptos necesarios para el desarrollo de esta tesis, como qué es la microbiota, el gen 16S rRNA, tecnologías de secuenciación y sus usos, las diferentes herramientas bioinformáticas para el análisis de datos y herramientas para el desarrollo de la aplicación web.

2.1 | Gen 16S para el estudio de comunidades microbianas / Estudio de microbiota a través del gen 16S y tecnologías de secuenciación

Microbiota

La microbiota es el conjunto de microorganismos (bacterias, virus, arqueas, u hongos) que habitan en un ambiente, ya sea en organismos multicelulares como humanos [1], animales [2] o plantas [3], y también en ambientes naturales como el océano [4] y el suelo [5]. Estos organismos que componen la microbiota se encuentran en un estado de simbiosis junto con el huésped, contribuyendo en funciones vitales como la homeostasis, regulación del sistema inmune, digestión de alimentos, producción de vitaminas, protección ante enfermedades y agentes patógenos [6–9]. Sin embargo,

una disbiosis o una baja diversidad en la microbiota puede llevar a una desregulación en el organismo huésped, incluyendo diversos tipos de enfermedades, fallas en el sistema inmune, falta de vitaminas, trastornos como depresión, estrés, e incluso diferentes tipos de cáncer en el caso del ser humano [8, 9].

La composición de la microbiota va cambiando dependiendo del área de estudio, pudiéndose encontrar diferentes microorganismos en las cavidades orales, zonas intestinales, genitales, cutáneas o tracto respiratorio [10].

Se estima que en el ser humano habitan más de 10 billones de microorganismos [11], es decir, poseemos cerca de 350 billones de células microbianas [7, 12], siendo este número al menos 10 veces mayor que el número de células humanas que poseemos.

En la naturaleza los microorganismos cumplen un rol fundamental en los ciclos bioquímicos del nitrógeno, carbono y fósforo [13, 14], como también en los procesos de desnitrificación, nitrificación y mineralización [13, 14]. Dependiendo del tipo de ambiente, los microorganismos también varían, en el caso del suelo por ejemplo, cambian dependiendo del tipo de suelo en el que están (agrícolas, forestales, humedales, pastos o suelos desérticos [15]) y de las características de éste como la temperatura, hidratación, profundidad, cantidad de carbono [16]. En el caso de las plantas, se ha demostrado que la microbiota presente ayuda a la adquisición de nutrientes [17], crecimiento, salud y resistencia a enfermedades [18–21].

La microbiota humana se puede ver afectada por diferentes factores, como los hábitos alimenticios, estilo de vida, uso de antibióticos, edad, estrés, entre otros [8]. La interacción con el medio ambiente influye notoriamente también, habiendo estudios que identifican cambios en la microbiota intestinal y cutánea en niños que interactúan con la naturaleza, plantas o suelo, identificando aumento en las vías inmunoregulatoras en comunidades microbianas cercanas a la naturaleza [22], como también se han identificado cambios en la microbiota de recién nacidos, infantes y adultos que viven con animales [23–25].

Conocer la diversidad microbiana asociada a organismos multicelulares permite conocer microorganismos patógenos que causan enfermedades infecciosas, lo cual ayudaría al diagnóstico y permitiría tomar acciones oportunas [26, 27]. **Un mejor cierre**

ARN Ribosomal 16S

El ARN ribosomal 16S es un gen perteneciente a la subunidad menor 30S que codifica el rRNA bacteriano y se encuentra en todas las bacterias. Está compuesto por 1542 pares de bases aproximadamente, divididas en 9 regiones hipervariables entrelazadas con regiones constantes [28]. Las regiones constantes son compartidas por todas las bacterias, mientras las regiones variables presentan cierto grado de variabilidad cambiando dependiendo de la especie.

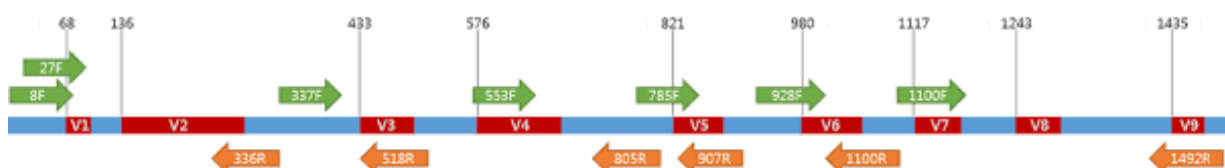


Figura 2.1. Estructura de las regiones constantes e hipervariables del gen 16S rRNA

hacer denuevo la figura

El uso de la macromolécula del ARN ribosomal 16S para el estudio de relaciones filogenéticas y de bacterias fue propuesto por Carl Woese a principios de 1970 [29]. Sus características únicas como su presencia en todas las bacterias, su alto grado de conservación (debido a que su función no cambia a través del tiempo) y su tamaño (el cuál permite ser lo suficientemente largo y preciso para la asignación taxonómica, y abordable para análisis bioinformáticos) hacen que hoy en día sea el marcador molecular más utilizado para la identificación de bacterias y comunidades microbianas [30–33].

Las regiones hipervariables permiten llevar a cabo la caracterización de los microorganismos, siendo la metodología más utilizada el secuenciar parcialmente el gen 16S, es decir, secuenciar una o dos regiones y realizar la asignación taxonómica en base a la región secuenciada. Diversos estudios se han llevado a cabo para determinar los efectos de la selección de la región a utilizar para la identificación, llegandose a determinar que la región hipervariable ha secuenciar influye en los resultados de la comunidad y en la diversidad de microorganismos que se caracteriza [34–37], y también que ciertas regiones hipervariables permiten identificar mejor ciertos grupos taxonómicos [buscar].

El gold standard para la identificación de bacterias durante muchos años fue el cultivo convencional en laboratorio, sin embargo, el cultivo puede durar desde días a semanas o incluso meses, y en algunos casos, hay bacterias que se logra cultivar en laboratorio [38]. Es por esto, que las tecnologías de secuenciación de próxima generación se presentarn como un método novedoso, rápido y preciso que se empezó a usar masivamente para la identificación de bacterias mediante la secuenciación del gen 16s [30]. Con el desarrollo de las tecnologías de secuenciación masiva, su bajo costo y alto throughput (cantidad de información que secuencian), la forma de caracterizar bacterias se ha vuelto más estándar y abordable al día de hoy [39, 40]. El estudio de comunidades microbianas mediante el gen 16S rRNA se ha vuelto una herramienta poderosa tanto en ambientes clínicos como ambientales, permitiendo obtener información de la diversidad de una muestra de manera más rápida y económica que con los métodos tradicionales [buscar].

Existen diferentes bases de datos que contienen la información de las secuencias del gen 16S para las diferentes bacterias, como 16S en bases de datos como RDP (Ribosomal Database Project [41]), 16S RefSeq [], Greengenes [42], Silva [] y el proyecto de microbioma humano (HMP) [].

Secuenciación de ADN

Todo ser vivo cuenta con una molécula de ADN que contiene toda la información genética del individuo, esta información se codifica a través de bases nitrogenadas: adenina (A), timina (T), citosina (C) y guanina (G) [43]. Al día de hoy se han desarrollado diferentes técnicas que permiten determinar la secuencia de nucleótidos en una molécula de ADN, este conjunto de técnicas se conocen como secuenciación de ADN.

Las tecnologías de secuenciación se pueden dividir en tres generaciones, cada una con diferentes características, como los largos de las moléculas a secuenciar, porcentaje de error, costo y cantidad de información que secuencian (throughput). Debido a las diferentes características de cada generación, al analizar las secuencias los análisis bioinformáticos y herramientas a utilizar también cambian [44].

La precisión de estas tecnologías se puede medir mediante la precisión de la lectura raw (precisión al leer un sólo fragmento de ácido nucleico a la vez) o la precisión de los ensamblajes mediante

consensos (reconstrucción de genomas completos).

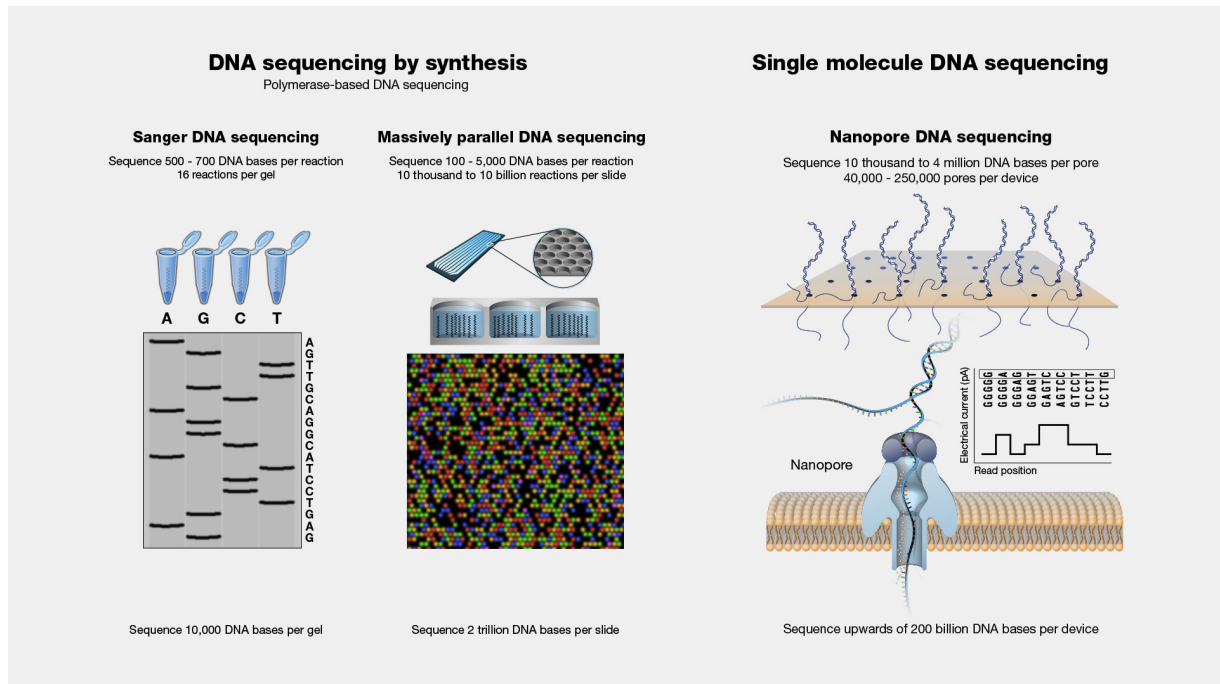


Figura 2.2. Comparativa tecnologías de secuenciación

Frederick Sanger introdujo la primera generación de tecnologías de secuenciación en el año 1977 a través del método Sanger, el cual utiliza el método de terminación de cadena para secuenciar [45]. Durante la PCR se añaden nucleótidos modificados (dNTPs) marcados con fluorescencia que al ser incorporados en la cadena de ADN detiene la elongación de la cadena y por ende, la replicación del ADN. Una vez que la reacción ha terminado, se realiza una electroforesis en gel que mediante una aplicación de electricidad que separa las moléculas de ADN por tamaño para luego poder determinar la secuencia de la cadena. Este método permite secuenciar moléculas de hasta **900pb** con una precisión de 99.9 % [46].

Sanger se utiliza ampliamente para secuenciar fragmentos individuales de ADN, pero es un método costoso e ineficiente al trabajar en proyectos de secuenciación de gran escala como por ejemplo genomas completos o metagenómica, por lo que para este tipo de proyectos se utilizan tecnologías de secuenciación de segunda y tercera generación.

Las tecnologías de secuenciación de segunda generación como Illumina, IonTorrent, Roche 454 y SOLiD, utilizaron como base la metodología de interrupción de cadena propuesta por Sanger. Las tecnologías de próxima generación secuencian simultáneamente millones de fragmentos cortos de ADN de manera paralela (fragmentos de hasta **300p** pares de bases) con una precisión de **99.9 %** [47].

Sanger permite la caracterización de bacterias mediante el gen 16S a nivel de especie debido a su alta precisión, sin embargo, permite solo secuenciar muestras aisladas donde solo este presente una bacteria a la vez, por lo que no es útil para la caracterización de comunidades microbianas completas. **muy útil en la identificación de patógenos clínicos**

Con la aparición de las tecnologías de secuenciación de segunda y tercera generación [31, 46], la secuenciación del gen 16S rRNA se convirtió en es una técnica masiva hoy en día para la caracterización de comunidades microbioanas e identificación tanto de patogenos o aislamiento de bacterias clínicas [33].

Estos métodos requieren la amplificación y secuenciación del gen 16S rRNA y el uso de herramientas bioinformáticas para la identificación y comparación con bases de datos.

Con la secuenciación del gen 16S rRNA se obtiene un conjunto de lecturas de ADN, donde cada lectura pertenece a una bacteria presente en la muestra. Estas lecturas se procesan y se comparán con bases de datos existentes para poder realizar la asignación taxonómica y poder identificar la bacteria. Finalmente lo que se obtiene es un perfil de toda la comunidad bacteriana de la muestra, todas las bacterias presentes que las herramientas bioinformáticas pudieron detectar, junto con su abundancia relativa.

Las tecnologías de secuenciación de próxima generación permiten la secuenciación de multiples fragmentso de ADN al mismo tiempo, permitiendo una secuenciación rápida y de bajo costo compada con la Sanger.

El umbral para distinguir especies bacterianas utilizando el gen 16S rRNA es de mínimo 97 % de similitud [47] **LEEER** <https://www.microbiologyresearch.org/content/journal/ijsem/10.1099/ijs.0.059774-0>

Las tecnologías de secuenciación de próxima generación presentan ventajas sobre Sanger a la hora de identificación de patogenos, permitiendo la identificacin en paralelo de bacterias en muestras complejas [48], como también presenta ventajas tanto en resolución taxonómica como en precisión [49].

Illumina

Intrduccion de que es illumina y como funciona illumina

Ultra-high-throughput microbial community analysis on the Illumina HiSeq and MiSeq platforms.

Las tecnologías de secuenciación de segunda generación, como Illumina e IonTorrent permiten secuenciar solo una parte del gen 16S rRNA, debido al tamaño de las moléculas que secuencian(lecturas de 200-400pb) [50]. Esto conlleva a que se deba decidir que región del gen secuenciar, para poder obtener la mayor diversidad posible presente en la muestra.

Illumina se ha convertido hoy en día en el estándar más utilizado para la secuenciación del gen 16S debido a su bajo costo, alta precisión (99.9 %) y cantidad de información que secuencian (throughput) [51]. Sin embargo, esta tecnología esta limitada por el largo de las moléculas que secuencia, debido a que al secuenciar con illumina solo se puede secuenciar una o dos regiones del gen 16S (de las 9 regiones hipervariables), lo que limita la resolución taxónomica, permitiendo asignar correctamente solo a nivel de género [52].Diversos estudios se han realizado para analizar que región permite obtener esta diversidad de manera precisa [53, 54], llegando a descubrirse que ciertos grupos taxonómicos se identifican de mejor manera al utilizar cierta regiones hipervariables [55, 56].

Al secuenciar el gen 16S con Illumina se sabe que existe presencia de ruido, por lo que se deben realizar filtros como la eliminación de quimeras, eliminación de secuencias singleton y otus raros [57,

[58], realizar denoising con dada [59] y unoise [60]. Todas estos filtros y metodologías de trabajo no están disponibles para usarse con TGS como Nanopore y PacBio, debido al porcentaje de error y al tamaño de las lecturas. Mientras algunos estudios han demostrado, que Nanopore presenta un porcentaje de ruido muy bajo, casi nulo [61], y a su vez, al secuenciar el gen completo, y no contar con OTUs, o ASV, permite mejorar el rendimiento de los estimadores de riqueza que se basan en estas metodologías, como los índices de chao1 [62], ACE [63], o brakaway [64]

Illumina sobrerrepresenta el número de especies debido al ruido? Nanopore is preferable over ...

Es por esto, que las tecnologías de tercera generación como Oxford Nanopore y PacBio se presentan como opciones prometedoras para la secuenciación del gen 16S rRNA, debido a su bajo costo y su capacidad de secuenciar el gen completo en una sola lectura, lo que permite una mayor resolución taxonómica a nivel de especie o incluso de strain [61] [65, 66]. revisar estas citas

Oxford Nanopore

incluso llegando a secuenciar en el espacio, Debido a su capacidad de secuenciar lecturas desde unas pocas kilobases hasta megabases [67], permite obtener información genómica más completa y contigua que las tecnologías de secuenciación de segunda generación, como Illumina.

Su bajo costo y su portabilidad, que permiten secuenciar

En sus inicios, la mayor limitante de utilizar Oxford Nanopore era su alto porcentaje de error. En el 2019 estudios reportaban que llegar a una resolución de especie no era aún posible con Nanopore [68]. Estudios posteriores, determinaron que la precisión de secuenciación se encontraba entre el 92 % al cerca del 96 % [65, 66], siendo aún inviable para la asignación taxonómica a nivel de especie creo que debería tener cuidado con esto, ya que este paper lo dice, pero otros no. Sin embargo, con la introducción de la nueva química a finales del 2021, el porcentaje de error reportado por nanopore disminuye notablemente, llegando a un 99.9 % de precisión, permitiendo la resolución taxonómica de especie [69]. buscar más citas

2.2 | Herramientas

El desarrollo de un flujo de trabajo automatizado para la caracterización de comunidades microbianas requiere el uso de diferentes herramientas bioinformáticas para el procesamiento de las secuencias, control de calidad, asignación taxonómica con base de datos, análisis de diversidad, caracterización funcional, etc. Por otro lado, el desarrollo de la aplicación web que estará enlazada al flujo de trabajo, requiere del uso de diferentes tecnologías web, librerías y de bases de datos para el almacenamiento de la información, generación de gráficos, y procesamiento de información. A continuación se presentan las principales herramientas a utilizar durante esta tesis.

Asignación taxonómica

La asignación taxonómica en el contexto de secuenciación del gen 16S, es el proceso donde dada una secuencia de ADN, se busca identificar a qué organismo pertenece. La metodología a utilizar para realizar la asignación va a depender de la tecnología de secuenciación que se haya utilizado, para las tecnologías de tercera generación lo más común es utilizar la base de datos de RefSeq para buscar la secuencia más parecida en la base de datos mediante alguna herramienta de alineamiento como

blast. Algunas metodologías exploran también la corrección de errores de estas secuencias y el clustering de las mismas para mejorar la asignación taxonómica. Existen diferentes herramientas para hacer asignación taxonómica de secuencias, algunas incluyen una asignación taxonómica directa a los datos luego del control de calidad, mientras otras herramientas buscan minimizar el error de Oxford Nanopore mediante metodologías de clustering o de algoritmos de maximización de expectativas. Algunas de las más utilizadas para trabajar con datos de Oxford Nanopore se presentan a continuación:

Epi2me

Plataforma desarrollada por Oxford Nanopore para el análisis de datos secuenciación obtenidos mediante sus dispositivos. Integra flujos de trabajo para realizar basecalling y demultiplexación, alineamiento, ensamblaje de SARS-CoV-2, asignación taxonómica de gen 16S, 18S, ITS, y metagenómica, variant calling, entre otros.

Mediante la interfaz gráfica el usuario puede seleccionar el análisis a realizar y configurar los parámetros. Debido a su interfaz de fácil uso permite al usuario abstraerse de la ejecución de herramientas o flujos de trabajo y de la necesidad de contar con recursos computacionales para la ejecución de los mismos. Los resultados se pueden descargar y visualizar mediante la misma plataforma.

Para la asignación taxonómica del gen 16S utiliza la herramienta blast con la base de datos de Genbank.

Esta herramienta entrega un archivo en formato CSV con la información de la lectura, asignación taxonómica a nivel de especie, porcentaje de identidad de la asignación, entre otras.

NanoCLUST

Nanoclust [70] es un flujo de trabajo desarrollado en Nextflow para la clasificación de amplicones del gen 16s obtenidos mediante secuenciación de Oxford Nanopore. Incluye pasos previos a la asignación taxonomica, como el basecalling, demultiplexación y control de calidad. Destaca por utilizar un clustering no supervisado (UMAP) y un paso exhaustivo de corrección de lecturas basada en los clusters obtenidos previo a la asignación taxonómica. Utiliza la base de datos de Genbank para realizar la asignación taxonómica.

Cabe destacar que este flujo de trabajo se encuentra descontinuado ya que fue desarrollado utilizando Nextflow DSL1 (estándar deprecado en la version 22.10.x). Además, debido a que la herramienta ha dejado de recibir soporte por parte de los desarrolladores, no se han actualizado pasos claves, como el basecalling y demultiplexación (pasos opcionales).

Esta herramienta entrega un archivo csv por cada categoría taxonómica (filo, clase, orden, familia, género, especie) con la cantidad de lecturas asignadas a cada taxonomía. De igual forma, se generan graficos de barra con las asignaciones, y un gráfico de la separación de los clusters. **mejorar.**

NanoRTax

NanoRTax [71] es un flujo de trabajo desarrollado en Nextflow que cuenta con una interfaz web que permite al usuario visualizar el progreso y resultados del pipeline. Recibe como entrada los archivos

FASTQ, a los cuales se les hace un control de calidad mediante fastp, y a continuación se realiza la asignación taxonómica mediante las herramientas Kraken2, Centrifuge y BLAST.

Al igual que NanoCLUST, NanoRTax utiliza DSL1 por lo que no es compatible con versiones nuevas de Nextflow.

El output de esta herramienta **XX**

EMU

EMU [72] busca realizar una corrección de errores y mejorar el error de Oxford Nanopore mediante un enfoque basado en algoritmos de maximización de expectativas para generar perfiles taxonómicos de la comunidad microbiana. Permite realizar estos perfiles utilizando diferentes bases de datos, como, la base de datos de Genbank, RDP y Silva v.138. En el caso de realizar análisis de la región ITS, permite integrar las base de datos de UNITE de fungi y eucariotas.

El output de esta herramienta es un archivo en formato TSV con los perfiles taxonómicos encontrados en cada muestra, es decir, el identificador del taxón, abundancia, especie y la información de todas las categorías taxonómicas.

EzBioCloud Microbial Taxonomic Profiling (MTP) pipeline and the PKSSU4.0 database

En algunos estudios se ha utilizado

VSEARCH [35] against the EzBioCloud 16S database.?

Hoy en día no hay establecidas buenas practicas para el procesamiento del gen 16S rRNA secuenciado mediante Oxford Nanopore, tanto al hablar de la herramienta para hacer asignación taxonómica, como al hablar de la base de datos al utilizar: leer para ver si citar <https://academic.oup.com/femsec/article/97/3/fiab001/6098400>

Herramientas bioinformáticas

Existen diferentes herramientas bioinformáticas que se pueden utilizar para el análisis y manipulación de datos de secuenciación, a continuación se presentan algunas de las más relevantes para este trabajo:

Guppy

Guppy es una suite de herramientas provista por Oxford Nanopore para realizar procesamiento de datos de secuenciación básicos. Permite realizar basecalling y demultiplexación, alineamiento, detección de bases modificadas, etc.

FastQC

FastQC[73] permite visualizar la calidad de los datos mediante métricas estándar de calidad, contenido GC, distribución de tamaños, niveles de duplicación y contenido de adaptadores.

Genera un reporte en formato html de fácil visualización separado por módulos, donde cada módulo presenta un estado de Aprobado, Fallido o Advertencia (dependiendo de la calidad de los datos).

Se desarrollo pensando en tecnología de secuenciación de lecturas cortas, las cuales poseen un porcentaje de error mucho más bajo (menor al 0.1 %) que las tecnologías de secuenciación de tercera generación (entre xx y xx %) y en análisis de genoma completo, por lo que algunos módulos pueden mostrarse como fallidos debido a la naturaleza de los datos de Oxford Nanopore, sin ser datos de baja calidad.

NanoPlot

NanoPlot [74] es una herramienta para la evaluación de calidad de datos de secuenciación de lecturas largas, permite visualizar la información de calidad, largo de lecturas y distribución de estas mediante gráficos interactivos.

Genera un reporte en formato html y gráficos interactivos que permiten visualizar la calidad de los datos, longitud de las lecturas, distribución de la calidad y longitud, entre otros.

Fastp

Fastp[75] es una herramienta de alto rendimiento diseñada para el procesamiento de archivos de secuenciación con calidad (fastq), permite realizar filtrado de secuencias (por calidad, largo), recortar extremos de baja calidad, recortar adaptadores, eliminar colas polyA, etc.

MultiQC

MultiQC [76] es una herramienta que permite resumir la información obtenida por diferentes herramientas bioinformaticas en un solo informe final. También permite integrar varias muestras en un solo reporte, y multiples pasos de analisis en un solo archivo html.

Seqkit

PICRUSt2

PICRUSt2 [77] es una herramienta para la predicción funcional utilizando secuencias marcadoras de genes. Generalmente se utiliza el gen 16S rRNA para realizar la predicción, pero también se pueden usar otros genes marcadores.

El output entrega archivos en formato CSV con la abundancia de los genes ortologos, la clasificación de las enzimas y las vías metabolicas predichos en cada muestra.

LEfSe

LEfSe (Linear discriminant analysis Effect Size) [78] determina las características que permiten explicar las diferencias entre diferentes clases o grupos al combinar pruebas estándar de significancia estadística junto con pruebas que codifican la consistencia biológica y relevancia del efecto encontrado.

vegan package

Vegan [79] es un paquete desarrollado para R que permite realizar análisis de la ecología comunitaria descriptiva. Contiene funciones de análisis de diversidad, metodos de ordenación comunitaria, análisis de disimilitud, funciones para vegetación y ecologos comunitarios.

Taxonkit

Taxonkit [80] permite la manipulación de información taxónomica de registros de NCBI de una manera eficiente. Dado un identificador taxonómico o un nombre de especie se puede obtener el lineage completo de esta.

csvtk

csvtk es una herramienta multiplataforma, eficiente y practica para la manipulación de archivos en formato CSV y TSV. Esta herramienta esta desarrollada para utilizarse en conjunto con otras suites de herramientas como TaxonKit, permitiendo obtener resultados de taxonomía de fácil visualización y manipulación para la integración en flujos de trabajo o scripts.

NCBI database

Tanto EPI2ME como Nanoclust utilizan la base de datos de ncbi.

Lenguajes de programación y Frameworks

Nextflow

Nextflow [81] es un framework open source para el desarrollo de flujos de trabajo, el cual permite la ejecución de éstos en diferentes entornos computacionales, ya sea en un computador personal, una plataforma de cómputo de alto rendimiento o en la nube. También permite la ejecución de flujos de trabajo de manera paralela, manejando los recursos computacionales de manera eficiente, y sencilla para el usuario. Al permitir el desarrollo de flujos de trabajo escalables y reproducibles es una buena alternativa que ha ganado popularidad debido a su facilidad de uso.

Cuenta con una comunidad llamada nf-core que se encarga de desarrollar flujos de trabajo para el análisis de datos biológicos, los cuales son revisados por la comunidad y publicados en su repositorio. Esto permite contar con una gran cantidad de flujos de trabajo disponibles, los cuales pueden ser ejecutados de manera sencilla por los usuarios, pero cabe destacar que hay que tener conocimientos de línea de comando para poder ejecutarlos.

python?

js

r?

FastAPI

Framework rápido y ligero para el desarrollo de APIs modernas de manera ágil utilizando Python y basado en sus anotaciones de tipo estandar. Utiliza pydantic para la validación de los datos de entrada y salida y starlette para el manejo de las peticiones HTTP. **no estoy 100 % segura**

SQLAlchemy

Librería de Python que permite la comunicación con base de datos no relacionales de manera sencilla, transformando los registros de la base de datos en objetos utilizables mediante Python. Gestiona la creación de modelos y consultas de forma sencilla.

Vue.js

Vue es un framework para la construcción de interfaces de usuario. Se basa en JavaScript, HTML y CSS para proporcionar un modelo de programación declarativo y basado en componentes que permite desarrollar interfaces de manera eficiente.

TypeScript

TypeScript [44] es un lenguaje de programación basado en JavaScript, el cual añade sintaxis adicional a JavaScript (o frameworks basados en JS) para soportar la integración de tipado de datos. Al especificar los tipos de datos, TypeScript tiene la capacidad de validarlos e informar errores cuando estos no correspondan.

Vuetify

Vuetify es un proyecto de código abierto para la construcción de interfaces utilizando los componentes de Vue. Permite la personalización de los componentes con SASS y SCSS, cuenta con un diseño responsivo, y una gran cantidad de componentes ya predefinidos.

PostgreSQL

PostgreSQL es un sistema de gestión de bases de datos relacionales de código abierto que se presentó como la continuación de POSTGRES. Permite el uso de tipos de datos complejos realizar consultas tanto relacionales (SQL) y no relacionales (JSON).

Gestores de paquetes

Conda

Conda [82] es una herramienta de código abierto, multiplataforma que permite la gestión de paquetes, dependencias y entornos de desarrollo de manera sencilla. Permite aislar entornos virtuales con características específicas, lo que facilita la reproducibilidad de los análisis y la portabilidad de los mismos. **Já**

Apptainer

Apptainer (antes llamado Singularity [83]) simplifica la creación y ejecución de contenedores, asegurando el encapsulamiento de los componentes de softwares necesarios para su reproducibilidad y portabilidad.

Docker

Creo que no es necesario

Métricas para la evaluación de la diversidad microbiana

que es la diversidad microbioana

Los índices de diversidad permiten evaluar diferentes aspectos de la biodiversidad en una comunidad, como la riqueza, dominancia, y uniformidad de los diferentes individuos en una comunidad microbiana. Existen diferentes índices de diversidad, los cuales se pueden dividir en índices de riqueza y de **uniformidad/divergencia**. Los índices de riqueza permiten evaluar la cantidad de especies presentes en una muestra, mientras que los índices de **uniformidad/divergencia** permiten evaluar la distribución de las especies en la muestra. A continuación se presentan algunos de los índices de diversidad más utilizados en la caracterización de comunidades microbianas.

Los índices de diversidad se dividen en índices de riqueza o uniformidad/divergencia.

Riqueza: Número de especies presentes en una comunidad, sin importar la cantidad de organismos presentes por cada especie.

Uniformidad: Abundancia relativa de estas especies.

Diversidad alfa

La diversidad alfa

Indice de Simpson

Mide la probabilidad de que al seleccionar dos individuos aleatorios de una muestra, ambos pertenezcan a la misma especie

Indice de Shannon

El índice de Shannon permite medir la uniformidad de una muestra, Conceptualmente representa el grado de incertidumbre al seleccionar un individuo aleatorio en una comunidad. Este índice suele expresarse mediante su complemento (1-D) donde valores cercanos 0 indican baja diversidad, es decir alta dominancia de algunas especies en específico, y valores cercanos a 1 indican alta diversidad, es decir una distribución homogénea entre las especies.

3

Flujo de trabajo y Aplicación Web

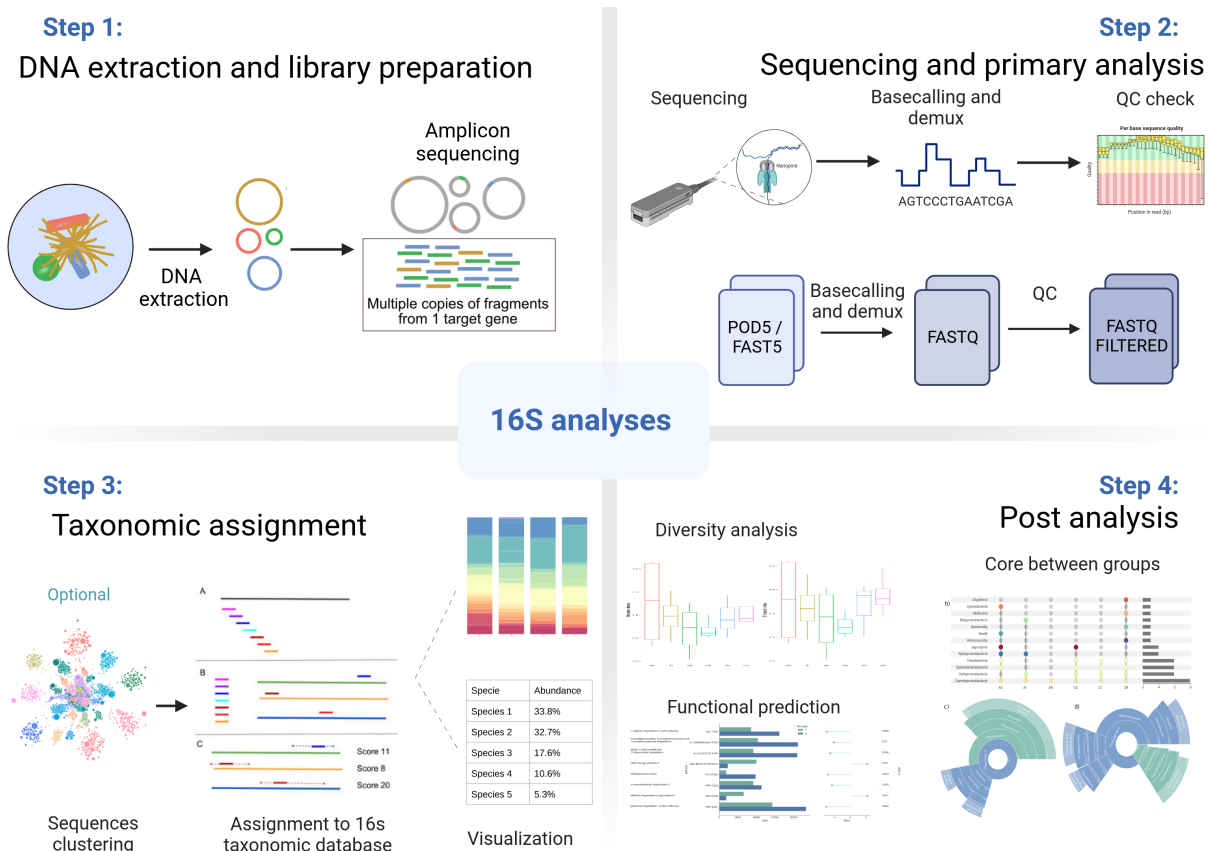


Figura 3.1. Flujo de trabajo estándar para la secuenciación y análisis de secuenciaciones del gen 16S

3.1 | Flujo de trabajo

Se desarrolló un flujo de trabajo automatizado en Nextflow que permite el análisis y caracterización de secuencias del gen 16S obtenidas mediante Oxford Nanopore. El flujo de trabajo está desarrollo de manera modular permitiendo que el usuario pueda personalizar su ejecución, agregando o quitando subworkflows o módulos según sus necesidades. Cuenta con los siguientes módulos:

- Basecalling y demultiplexacion:
- Control de calidad:
- Asignación taxonómicas:
- Caracterización de la comunidad microbiana:

Desarrollo de contenedores o conda enviroments

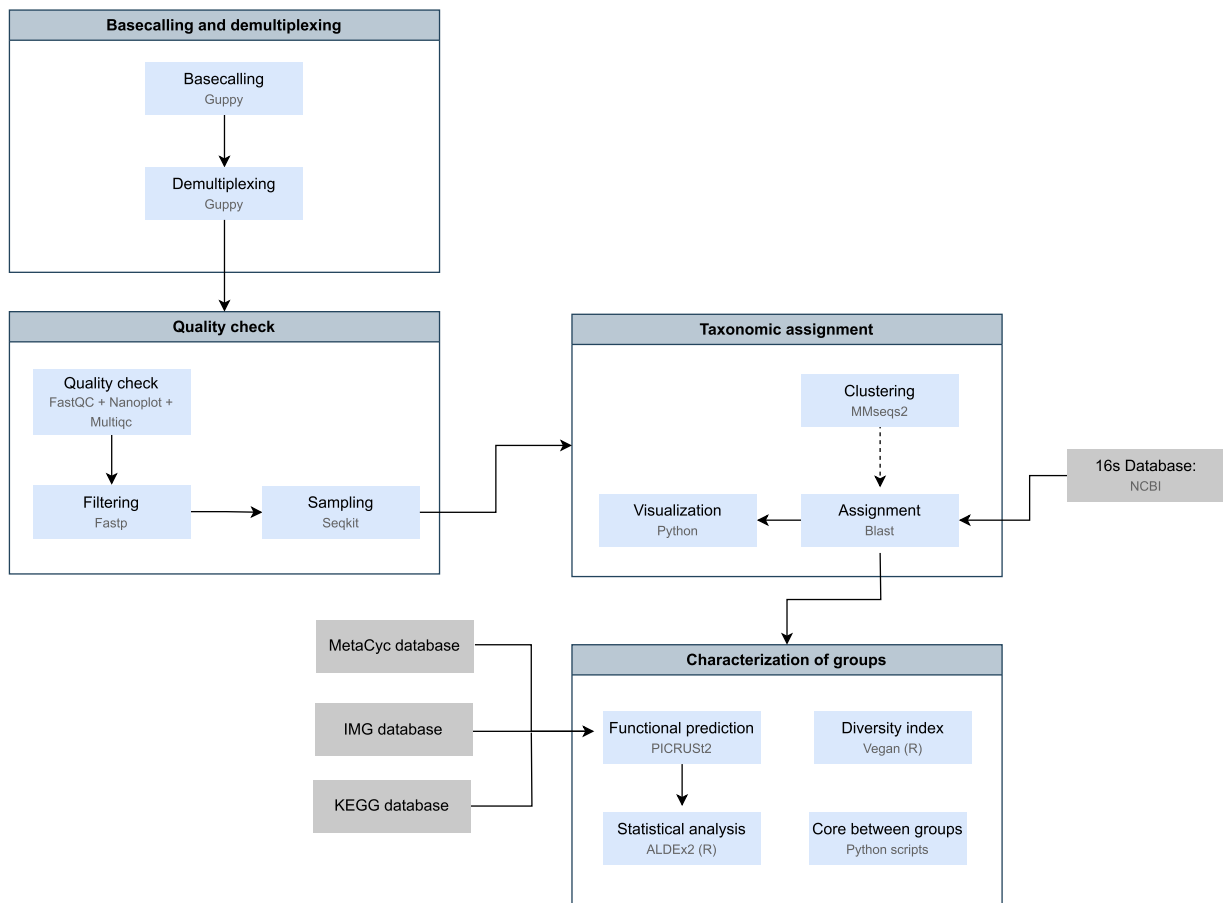


Figura 3.2. Bioinformatics pipeline

El flujo de trabajo cuenta con parámetros generales que son independientes de los módulos:

- stage: Subworkflow a ejecutar. Puede contener los siguientes valores:
 - All_without_basecalling: Ejecutar todo el flujo de trabajo sin incluir basecalling y demultiplexación.

- All_with_basecalling: Ejecutar todo el flujo de trabajo incluyendo el proceso de basecalling y demultiplexacion.
- Preprocessing: Ejecutar solo el subworkflow de preprocesamiento
- TaxonomyAssignment: Ejecutar el modulo de asignación taxonomica.
- Visualization: Ejecutar solo el subworkflow de visualización de gráficos
- Functional: Ejecutar solo el subworkflow de predicción funcional
- Diversity: Ejecutar solo los modulos de índices de diversidad
- input:
- samples.csv:

Ejecución de flujo de trabajo completo

hacer un esquema de los casos del uso, que el usuario puede comenzar con fastq, pod5, o hacer solo los graficos, etc

Control de calidad

Este módulo primero se encarga de realizar un control de calidad a las secuencias mediante las herramientas FastQC y Nanoplot. Posteriormente, se eliminan secuencias de baja calidad y secuencias no pertenecientes al gen 16s (basado en el tamaño de la lectura). Para esto, se utiliza el software Fastp que permite realizar las tareas mencionadas anteriormente.

Input: Output: Parámetros:

FastQC y Nanoplot

FastQC y Nanoplot reciben como input el archivo FASTQ a procesar y entrega como output un archivo HTML con el reporte del control de calidad. Este reporte será utilizado para integrar la información de este proceso en el reporte de MultiQC. En el flujo de trabajo ambas herramientas se utilizarán dos veces, una vez con el archivo FASTQ raw y otra vez con el archivo FASTQ preprocesado.

Fastp Parametros

- q 15
- cut_mean_quality 15
- length_required 1000
- length_limit 2200
- disable_adapter_trimming
- disable_trim_poly_g

Fastp recibe como input el archivo FASTQ raw y entrega como output el archivo FASTQ preprocesado. De igual manera, entrega un reporte en formato HTML y un reporte en formato JSON, el cual posteriormente será utilizado para integrar la información de este proceso en el reporte de MultiQC.

SEQKIT

Seqkit se utilizará para realizar un subsampleo de la muestra y evitar sesgos a la hora de realizar la caracterización por grupos debido a la cantidad de lecturas de cada muestra. Recibe como input el archivo FASTQ preprocesado. Posteriormente el archivo subsampleado se transformará a formato FASTA mediante la misma herramienta, y será utilizado para realizar la caracterización de la comunidad microbiana.

Asignación taxonómica

Clustering con MMSEQS

BLAST

Para la asignación taxonómica se utiliza BLAST con la base de datos de 16s de Genbank.

- -mt_mode 1
- -outfmt "6 qseqid staxids sscinames evaluelength pident qcovs"
- -evalue 0.001
- -max_target_seqs 1

Para asegurar que las secuencias sean asignadas a la taxonomía correcta, se utiliza un evalue de 0.001 y un porcentaje de identidad mayor a **XX**. EL output de BLAST es un archivo de formato tabular (TSV) que contiene el identificador de la muestra, el id de la taxonomía asociada a la secuencia, el nombre científico de la taxonomía, el valor de evalue, el largo de la secuencia, el porcentaje de identidad y el porcentaje de cobertura de la secuencia.

Mediante TaxonKit se obtiene el linaje completo de la taxonomía asignada a la secuencia, y se formatea mediante CSVtk.

MERGE_BLAST_OUT

Se desarrollo un script en python para resumir la asignación taxonomica obtenida con BLAST de todas las muestras en un solo archivo. Además, se generan archivos por cantidad de lecturas y porcentaje, y por cada categoría taxonomica.

Caracterización de la comunidad microbiana

Stacked Plots

Se desarrollo un script en python que grafica las taxonomias en graficos de barras apiladas, permitiendo visualizar la distribución de las taxonomias en las muestras. En caso de que el usuario haya ingresado grupos asignados a cada muestra también se obtendrán graficos de barras apiladas de los grupos. Las taxonomías menores a un 1 % (valor por defecto y modificable) se agrupan en una nueva taxonomía llamada **otros** se muestra en color gris.

- -taxonomy_input_file: Archivo en formato **csv** donde las columnas son las muestras, las filas las taxonomicas y el valor de abundancia de cada taxonomia en cada muestra en el **centro**.

- `-annotate_tax`: En caso de ser true se anotara el nombre de la taxonomia y el porcentaje en la barra.
- `min_abundance_annotate`: Porcentaje de abundancia maximo para agrupar las taxonomicas en sección de otros

Core Plot

Se desarrollo un script en python que realiza un grafico circular jerarquico de las taxonomias compartidas entre las muestras. Este grafico puede realizarse a nivel de grupos (siempre que el usuario hubiera ingresado los grupos en el archivo de metadata), y también se realiza entre todas las muestras. Input: CSV de taxonomia a nivel de especie por muestra y archivo de linajes. Output: Grafico circular jerarquico de las taxonomias compartidas entre las muestras en formato PDF

Indices de diversidad

shannon simpson chao

Prediccion Funcional

La predicción funcional se realiza mediante la herramienta PICRUST2.

Input: output: Picrust2 + aldex + Lefse

3.2 | Base de datos

Tabla de Usuarios

campo	tipo de dato	descripción	PK	FK
id	int	ID	Si	No
username	str	Nombre de usuario	No	No
fullname	str	Nombre completo	No	No
email	str	Email	No	No
hasshed_password	str		No	No
is_active	bool		No	No
role_platform_id	int		No	Si

Tabla 3.1. Tabla Users

Roles de la plataforma

campo	tipo de dato	descripción	PK	FK
id	int	ID	Si	No
name	str	Nombre del rol (admin / basic user)	No	No
description	str	Descripción del rol	No	No

Tabla 3.2. Tabla PlatformRole

Proyectos

campo	tipo de dato	descripción	FK
id	int (PK)	ID	No
name	str	Nombre del proyecto	No
description	str	Descripción del proyecto	No
samples	JSON/dict[str,any}	Metadata de las muestras. Puede contener como claves: Barcode, Sample, Group, Subgroup	No
colaboration	str	???	No
type_file_in	str	Tipo de archivo a procesar (POD5, FASTQ, CSV, FASTA)	No
path_data	str	Ruta en el servidor donde se almacenaran los archivos de entrada	No
status	str	Estado del proyecto en ejecución (upload_data / running / failed / finish)	No
note	JSON/dict[str,any}	Información sobre el proyecto (cantidad de muestras total, procesadas y descartadas)	No
logs	JSON/dict[str,any}	Logs	No
owner_id	int	Id del usuario que sube el proyecto	Si

Tabla 3.3. Tabla de Proyectos

Roles del Proyecto

campo	tipo de dato	descripción	FK
id	int (PK)	ID	No
name	str	Nombre del rol (leer, escribir, eliminar)	No
description	str	Descripción del rol	No

Tabla 3.4. Tabla de Roles de Proyectos

Roles Proyectos y Usuarios

campo	tipo de dato	descripción	FK
user_id	int (PK)	ID del usuario	Si
project_id	int (PK)	ID del proyecto	Si
role_id	int (PK)	Rol del usuario dentro del proyecto en específico	Si

Tabla 3.5. Tabla de Roles Proyectos y Usuarios

Resultados

campo	tipo de dato	descripción	FK
id	int	ID	No
taxonomic_assignment	JSON/dict[str,any]	Asignación taxonomica por muestra y por nivel taxonómico (especie, genero, familia, orden, clase y filo)	No
functional_prediction	JSON/dict[str,any]	Resultados de la predicción funcional por muestra y por categoría funcional (EC, Pathways, KO)	No
core	JSON/dict[str,any]	Cantidad de lecturas/porcentaje compartido entre los grupos	No
basic_statistics	JSON/dict[str,any]	Estadísticas básicas de las muestras (Total de lecturas procesadas y sin procesar, calidad y largo promedio)	No
diversity	JSON/dict[str,any]	Calculo de los indices de diversidad (Shannon, Simpson, Chao2)	No
config_run	JSON/dict[str,any]	Parámetros personalizados por el usuario	No
project_id	int	ID del proyecto	Si

Tabla 3.6. Tabla de Resultados

3.3 | Aplicación Web

Se desarrollo una aplicación web mediante Vue3 y FastAPI que permite al usuario subir sus archivos de secuenciación y metadata. Con esto el usuario puede abstraerse de tener conocimiento en línea de comando o ejecución de herrsamientas bioinformaticas o flujos de trabajo, ya que mediante la interfaz web el usuario selecciona los análisis que desea realizar. La información ingresada por el usuario es guardada en la base de datos y la misma **plataforma/bd/script** se encarga de ejecutar el pipeline de manera automatica. Una vez el pipeline termina de ejecutarse se escriben todos los resultados **(o durante la ejecución)** en la base de datos. La plataforma lee esta información en la base de datos y despliega los resultados en el menu de proyectos y analisis.

Middleware

Security

Login

Al ingresar en la página de Login, el usuario deberá ingresar su nombre de usuario y contraseña. En caso de que los datos sean correctos será redireccionado a la página de proyectos (Ver sección **siguiente.**). En caso de que los datos sean incorrectos se mostrará un mensaje de error con el mensaje *“Usuario o contraseña incorrectos”* y deberá ingresar sus credenciales nuevamente. **Debo añadir que la gente pueda crear su propia cuenta D;**

Cambio de contraseña

En el caso de que el usuario desee cambiar su contraseña puede hacerlo en esta sección. Para ello deberá escribir su contraseña actual y su nueva contraseña dos veces. En caso de que la contraseña actual sea incorrecta se mostrará un mensaje de error con el mensaje *“Contraseña actual incorrecta”*. En caso de que las contraseñas nuevas no coincidan se mostrará un mensaje de error con el mensaje *“Las contraseñas no coinciden”*. En caso de que la contraseña sea cambiada con éxito se mostrará un mensaje de éxito con el mensaje *“Contraseña cambiada con exito”*.

Resultados/Proyectos

Una vez que el usuario valida sus credenciales en la plataforma será redireccionado a la sección de Resultados. En esta sección se mostraran los proyectos que el usuario ha subido a la plataforma, estos proyectos pueden estar en ejecución, finalizados o finalizados con errores. Por cada proyecto se desplegará la información básica en una tarjeta:

- Nombre del proyecto
- Descripción del proyecto
- Cantidad de muestras procesadas, descartadas y totales
- Estado del proyecto (upload_data / running / failed / finish)
- En caso de que el proyecto haya finalizado el usuario podrá acceder a la sección específica de resultados del proyecto mediante el botón de Ver resultados.

Nuevo análisis

En esta sección el usuario podrá ingresar información de un proyecto de secuenciación al cual se le desea realizar los análisis.

El usuario deberá rellenar la información básica del proyecto como, Nombre del proyecto y descripción. El usuario puede subir la información en diferentes formatos, dependiendo del análisis que desee realizar.

- POD5: En caso de querer comenzar desde el basecalling.
- FASTQ: En caso de querer saltarse el paso de basecalling y demultiplexación e iniciar directamente con el control de calidad o asignación taxonómica.

A continuación el usuario deberá subir un archivo de metadata en formato (XLSX) que deberá contener la información de la muestras:

- sample: identificador de la muestra (obligatorio)
- barcode: barcode que identifica la muestra (en caso de querer realizar basecalling demultiplexación)
- group: grupo al que pertenece cada muestra (en caso de querer hacer diferenciación entre grupos)
- subgroup: subgrupo al que pertenece cada muestra (en caso de querer hacer diferenciación entre subgrupos)

A continuación el usuario deberá seleccionar los análisis que desea realizar. Cabe destacar que el usuario puede seleccionar todos los análisis o solo algunos de ellos. Los análisis disponibles son:

- Basecalling y demultiplexacion
- Filtros y control de calidad
- Asignación taxonomica

- Índices de diversidad
- Predicción funcional

La plataforma se encarga de verificar si el archivo de metadata cuenta con la información necesaria para realizar cada análisis. En caso de que el archivo de metadata no cuente con la información necesaria y el usuario desee realizar uno de esos análisis, se desplegará un mensaje de error al lado del análisis indicando que información se debe añadir en el archivo de metadata. Los parámetros que se pueden modificar son los siguientes:

- Basecalling y demultiplexación: Flowcell, kit de ligación y kit de barcoding utilizados durante la secuenciación. Modelo a utilizar para realizar el basecalling
- QC: Longitud mínima y máxima en pares de bases de las lecturas, calidad mínima de las lecturas y cantidad de lecturas a utilizar para los análisis posteriores(subsampleo).
- Predicción funcional: **completar**

En la parte derecha del componente el usuario puede visualizar los parámetros por defecto y modificarlos en caso de que lo desee.

En la parte inferior del componente se encuentra el botón de Subir data, el cual al hacer click en el, ingresará la información a la base de datos y copiará los archivos a la plataforma de computo. Una vez que el usuario presiona el botón de subir data, la plataforma se encarga de verificar que se cuente con toda la información necesaria para correr el pipeline.

Resultados de un proyecto en específico

Una vez que el pipeline haya finalizado su ejecución, la plataforma leerá los resultados desde la base de datos y desplegará la información en la sección de resultados de un proyecto en específico. Esta sección cuenta con 5 subsecciones, cada una con información específica del análisis realizado. En caso de que al ingresar el proyecto el usuario no seleccione todos los análisis a ejecutar, solo se mostrarán las secciones indicadas por el usuario.

De que muestras puedo poner información en mi tesis?

Información Básica de las muestras

Esta sección se mostrará siempre que el usuario empiece con archivos POD5 o FastQ, es decir, ya sea comenzando el análisis desde el basecalling o desde el control de calidad. **Igual si es que solo se hace asignación taxonomica.**

Al lado izquierdo del componente se puede visualizar una tabla con la información básica de cada muestra:

- Nombre de la muestra
- Total de lecturas
- Calidad promedio
- Largo promedio

- Total de lecturas después del control de calidad
- Nota (en caso de que la muestra haya sido descartada se indica en esta columna)

En la parte inferior de la tabla hay una nota que indica la cantidad de lecturas que se consideraron para los análisis posteriores (subsampling).

En la parte derecha de la sección se puede visualizar un heatmap donde en el eje X se encuentra el tamaño de las lecturas, y en el eje Y la calidad. El color indica la cantidad de lecturas que se encuentran en esa intersección, mientras más azul, más lecturas tienen la calidad y tamaño indicado. Para este gráfico se consideraron todas las muestras con sus lecturas **antes de los filtros de calidad o después?**.

En la parte inferior del gráfico hay una nota que indica la cantidad de lecturas que se encuentran en un rango específico. **Este valor es variable**

Asignación taxonómica

La sección de asignación taxonómica cuenta con un gráfico de barras apiladas y una tabla por cada categoría taxonómica (especie, género, familia, orden, clase y filo). En la leyenda del gráfico de barras apiladas solo se muestran las 10 taxonomías con mayor abundancia. El usuario puede moverse a través del gráfico y posicionarse en las barras para poder visualizar el nombre de la taxonomía y el porcentaje o cantidad de lecturas en una muestra en específico. Todas aquellas taxonomías que tienen un porcentaje menor a un 1 % (valor por defecto) son agrupadas en una nueva taxonomía llamada *Otros*. En la parte superior de la tabla se encuentra un campo de texto donde el usuario puede buscar una taxonomía en específico y visualizar su abundancia o cantidad de lecturas en todas las muestras.

El usuario puede visualizar la información en porcentaje o en cantidad de lecturas manipulando el botón de la parte inferior del gráfico. Así también puede modificar el porcentaje utilizado para generar la taxonomía *Otros*.

En caso de que el usuario al crear el proyecto hubiera ingresado información de los grupos asociados a las muestras, se podrá visualizar un nuevo grupo de botones que permiten al usuario visualizar la información de las taxonomías por grupo o por muestra.

Similitud entre las muestras

En esta sección se puede visualizar un gráfico Sunburst el cual representa las taxonomías compartidas entre una cantidad de muestras específicas. Mientras más grande el anillo en el gráfico, indica que la presencia de esa taxonomía es mayor. Cada nivel de anillo representa una categoría taxonómica, siendo la más interna especie y la más externa filo. En caso de que el usuario haya ingresado grupos asociados a las muestras, se podrán visualizar más gráficos de Sunburst en la sección, un gráfico por cada grupo. En el caso de que el usuario no haya ingresado grupos, podrá visualizar solamente un gráfico que mostrará las taxonomías compartidas entre todas las muestras.

En caso de que un grupo no tenga taxonomías compartidas entre sí, se desplegará un mensaje indicando esto. En la parte inferior del gráfico, al lado derecho de la leyenda se puede visualizar un icono, el cual al posicionarse sobre él, va a mostrar las muestras utilizadas para generar el gráfico.

Indices de diversidad

En caso de que el usuario hubiera ingresado grupos al inicio del proyecto, se podrá visualizar tres gráficos boxplot, uno por cada índice de diversidad (Shannon, Simpson y Chao2). En caso de que el usuario no haya ingresado grupos, esta sección no se desplegará en la plataforma.

Predicción funcional

En esta sección se presenta una tabla con la información de la predicción funcional obtenida mediante PICRUST2 (EC, KO y Pathways) para cada muestra. En la parte superior se puede visualizar un campo de texto de búsqueda con el cual el usuario puede filtrar la información de la tabla.

En el lado derecho de la sección, en caso de que el usuario hubiera ingresado grupos, se puede ver un gráfico de barras horizontales que muestra los pathways con diferencias significativas entre los grupos (información obtenida mediante Lefse). En caso de que no se haya ingresado información de grupos, solo se desplegará la tabla.

Descarga de los resultados

En la parte superior derecha de la sección de resultados, se encuentra un botón con el texto Download data. Al hacer click en este botón se descargará un archivo comprimido con toda los resultados generados por el pipeline.

- CSV de asignación taxonomica por muestra y por grupo (en caso de ingresarse), y por porcentaje y cantidad de lecturas
- CSV de predicción funcional (EC, KO y pathways)
- CSV con los valores del calculo de los indices de diversidad
- PDF con los gráficos de barras apiladas, Sunburst y boxplot
- Archivo de texto con la información del pipeline (versión, parámetros, etc)

graficos, csv, información de las bds y versión del pipeline

Documentación

En esta sección se despliega la documentación del pipeline, la cual cuenta con la información de los módulos, parámetros y herramientas utilizadas en el pipeline. La documentación se encuentra dividida por cada módulo, donde se muestra la versión de la herramienta utilizada y los parámetros por defecto y modificables por el usuario.

Basecalling y demultiplexación

Control de calidad

Asignación taxonómica

Predicción funcional

Indices de diversidad

4

Discusión

glosario

- lecturas
- pthread
- pares de bases
- API (application programming interface o interfaz de programación de aplicaciones),
- JSON
- ORM (Object-Relational Mapping)
- UMAP
- FASTQ
- POD5
- FASTA
- CSV
- evalue: The statistical significance threshold for reporting matches against database sequences
- min coverage: Minimum horizontal coverage for a query sequence to be considered a match
- Min identity: Minimum proportion of identical bases between the query and the subject sequence
- Max target sequences: Number of aligned sequences to keep for each query
- throughput
- raw
- profundidad: Múltiples lecturas en una misma región

Bibliografía

1. Gilbert, J. A., Blaser, M. J., *et al.* Current understanding of the human microbiome. *Nature medicine* **24**, 392–400 (2018).
2. Bahrndorff, S., Alemu, T., Alemneh, T., Lund Nielsen, J., *et al.* The microbiome of animals: implications for conservation biology. *International journal of genomics* **2016** (2016).
3. Berendsen, R. L., Pieterse, C. M. & Bakker, P. A. The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in plant science* **17**, 478–486 (2012).
4. Moran, M. A. The global ocean microbiome. *Science* **350**, aac8455. doi:10.1126/science.aac8455. eprint: <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.aac8455> (2015).
5. Banerjee, S. & Van Der Heijden, M. G. Soil microbiomes and one health. *Nature Reviews Microbiology* **21**, 6–20 (2023).
6. Marco, M. L. Defining how microorganisms benefit human health. *Microbial Biotechnology* **14**, 35–40 (2021).
7. Fijan, S. Microorganisms with claimed probiotic properties: an overview of recent literature. *International journal of environmental research and public health* **11**, 4745–4767 (2014).
8. Altveş, S., Yildiz, H. K. & Vural, H. C. Interaction of the microbiota with the human body in health and diseases. *Bioscience of microbiota, food and health* **39**, 23–32 (2020).
9. Hou, K., Wu, Z.-X., *et al.* Microbiota in health and diseases. *Signal transduction and targeted therapy* **7**, 1–28 (2022).
10. Ursell, L. K., Clemente, J. C., *et al.* The interpersonal and intrapersonal diversity of human-associated microbiota in key body sites. *Journal of Allergy and Clinical Immunology* **129**, 1204–1208 (2012).
11. Sender, R., Fuchs, S. & Milo, R. Revised estimates for the number of human and bacteria cells in the body. *PLoS biology* **14**, e1002533 (2016).
12. Ley, R. E., Peterson, D. A. & Gordon, J. I. Ecological and evolutionary forces shaping microbial diversity in the human intestine. *Cell* **124**, 837–848 (2006).
13. Bitton, G. Role of microorganisms in biogeochemical cycles. *Wastewater Microbiology*, 51–73 (1994).
14. Gougoulas, C., Clark, J. M. & Shaw, L. J. The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **94**, 2362–2371 (2014).
15. Jiao, S., Chen, W. & Wei, G. Linking phylogenetic niche conservatism to soil archaeal biogeography, community assembly and species coexistence. *Global Ecology and Biogeography* **30**, 1488–1501 (2021).
16. Bickel, S. & Or, D. Soil bacterial diversity mediated by microscale aqueous-phase processes across biomes. *Nature Communications* **11**, 116 (2020).
17. Hu, J., Wei, Z., *et al.* Probiotic *Pseudomonas* communities enhance plant growth and nutrient assimilation via diversity-mediated ecosystem functioning. *Soil Biology and Biochemistry* **113**, 122–129 (2017).
18. Lemanceau, P., Blouin, M., Muller, D. & Moëgne-Loccoz, Y. Let the core microbiota be functional. *Trends in Plant Science* **22**, 583–595 (2017).
19. Hardoim, P. R., Van Overbeek, L. S., *et al.* The hidden world within plants: ecological and evolutionary considerations for defining functioning of microbial endophytes. *Microbiology and molecular biology reviews* **79**, 293–320 (2015).
20. Vorholt, J. A. Microbial life in the phyllosphere. *Nature reviews microbiology* **10**, 828–840 (2012).
21. Compant, S., Samad, A., Faist, H. & Sessitsch, A. A review on the plant microbiome: Ecology, functions, and emerging trends in microbial application. *Journal of Advanced Research* **19**. Special Issue on Plant Microbiome, 29–37. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.004> (2019).
22. Roslund, M. I., Puhakka, R., *et al.* Biodiversity intervention enhances immune regulation and health-associated commensal microbiota among daycare children. *Science advances* **6**, eaba2578 (2020).
23. Tun, H. M., Konya, T., *et al.* Exposure to household furry pets influences the gut microbiota of infants at 3–4 months following various birth scenarios. *Microbiome* **5**, 1–14 (2017).

24. Azad, M. B., Konya, T., *et al.* Infant gut microbiota and the hygiene hypothesis of allergic disease: impact of household pets and siblings on microbiota composition and diversity. *Allergy, Asthma & Clinical Immunology* **9**, 1–9 (2013).
25. Kates, A. E., Jarrett, O., *et al.* Household pet ownership and the microbial diversity of the human gut microbiota. *Frontiers in cellular and infection microbiology* **10**, 73 (2020).
26. Yan, T., O'Brien, P., Shelton, J., Whelen, A. & Pagaling, E. Municipal wastewater as a microbial surveillance platform for enteric diseases: a case study for Salmonella and salmonellosis. *Environmental science & technology* **52**, 4869–4877 (2018).
27. Rackaityte, E. & Lynch, S. V. The human microbiome in the 21st century. *Nature communications* **11**, 5256 (2020).
28. Clarridge III, J. E. Impact of 16S rRNA gene sequence analysis for identification of bacteria on clinical microbiology and infectious diseases. *Clinical microbiology reviews* **17**, 840–862 (2004).
29. Olsen, G. J. & Woese, C. R. Ribosomal RNA: a key to phylogeny. *The FASEB journal* **7**, 113–123 (1993).
30. Reller, L. B., Weinstein, M. P. & Petti, C. A. Detection and identification of microorganisms by gene amplification and sequencing. *Clinical infectious diseases* **44**, 1108–1114 (2007).
31. Janda, J. M. & Abbott, S. L. 16S rRNA gene sequencing for bacterial identification in the diagnostic laboratory: pluses, perils, and pitfalls. *Journal of clinical microbiology* **45**, 2761–2764 (2007).
32. López-Aladid, R., Fernández-Barat, L., *et al.* Determining the most accurate 16S rRNA hypervariable region for taxonomic identification from respiratory samples. *Scientific reports* **13**, 3974 (2023).
33. Patel, J. B. 16S rRNA gene sequencing for bacterial pathogen identification in the clinical laboratory. *Molecular diagnosis* **6**, 313–321 (2001).
34. Klindworth, A., Pruesse, E., *et al.* Evaluation of general 16S ribosomal RNA gene PCR primers for classical and next-generation sequencing-based diversity studies. *Nucleic acids research* **41**, e1–e1 (2013).
35. Mizrahi-Man, O., Davenport, E. R. & Gilad, Y. Taxonomic classification of bacterial 16S rRNA genes using short sequencing reads: evaluation of effective study designs. *PloS one* **8**, e53608 (2013).
36. Guo, F., Ju, F., Cai, L. & Zhang, T. Taxonomic precision of different hypervariable regions of 16S rRNA gene and annotation methods for functional bacterial groups in biological wastewater treatment. *PloS one* **8**, e76185 (2013).
37. Soergel, D. A., Dey, N., Knight, R. & Brenner, S. E. Selection of primers for optimal taxonomic classification of environmental 16S rRNA gene sequences. *The ISME journal* **6**, 1440–1444 (2012).
38. Didelot, X., Bowden, R., Wilson, D. J., Peto, T. E. & Crook, D. W. Transforming clinical microbiology with bacterial genome sequencing. *Nature Reviews Genetics* **13**, 601–612 (2012).
39. Woo, P. C., Lau, S. K., Teng, J. L., Tse, H. & Yuen, K.-Y. Then and now: use of 16S rDNA gene sequencing for bacterial identification and discovery of novel bacteria in clinical microbiology laboratories. *Clinical Microbiology and Infection* **14**, 908–934 (2008).
40. Tanner, A., Maiden, M. F., Paster, B. J. & Dewhirst, F. E. The impact of 16S ribosomal RNA-based phylogeny on the taxonomy of oral bacteria. *Periodontology 2000* **5**, 26–51 (1994).
41. Cole, J. R., Wang, Q., *et al.* Ribosomal Database Project: data and tools for high throughput rRNA analysis. *Nucleic acids research* **42**, D633–D642 (2014).
42. DeSantis, T. Z., Hugenholtz, P., *et al.* Greengenes, a chimera-checked 16S rRNA gene database and workbench compatible with ARB. *Applied and environmental microbiology* **72**, 5069–5072 (2006).
43. Watson, J. D. & Crick, F. H. Molecular structure of nucleic acids: a structure for deoxyribose nucleic acid. *Nature* **171**, 737–738 (1953).
44. Bierman, G., Abadi, M. & Torgersen, M. *Understanding typescript* in *European Conference on Object-Oriented Programming* (2014), 257–281.
45. Sanger, F. & Coulson, A. R. A rapid method for determining sequences in DNA by primed synthesis with DNA polymerase. *Journal of molecular biology* **94**, 441–448 (1975).
46. Pollock, J., Glendinning, L., Wisedchanwet, T. & Watson, M. The madness of microbiome: attempting to find consensus “best practice” for 16S microbiome studies. *Applied and environmental microbiology* **84**, e02627–17 (2018).
47. Kim, M., Oh, H.-S., Park, S.-C. & Chun, J. Towards a taxonomic coherence between average nucleotide identity and 16S rRNA gene sequence similarity for species demarcation of prokaryotes. *International journal of systematic and evolutionary microbiology* **64**, 346–351 (2014).
48. Peker, N., Garcia-Croes, S., *et al.* A comparison of three different bioinformatics analyses of the 16S–23S rRNA encoding region for bacterial identification. *Frontiers in microbiology* **10**, 620 (2019).
49. Motro, Y. & Moran-Gilad, J. Next-generation sequencing applications in clinical bacteriology. *Biomolecular detection and quantification* **14**, 1–6 (2017).
50. Salipante, S. J., Kawashima, T., *et al.* Performance comparison of Illumina and ion torrent next-generation sequencing platforms for 16S rRNA-based bacterial community profiling. *Applied and environmental microbiology* **80**, 7583–7591 (2014).

51. Pichler, M., Coskun, Ö. K., *et al.* A 16S rRNA gene sequencing and analysis protocol for the Illumina MiniSeq platform. *Microbiologyopen* **7**, e00611 (2018).
52. Johnson, J. S., Spakowicz, D. J., *et al.* Evaluation of 16S rRNA gene sequencing for species and strain-level microbiome analysis. *Nature communications* **10**, 5029 (2019).
53. Liu, Z., DeSantis, T. Z., Andersen, G. L. & Knight, R. Accurate taxonomy assignments from 16S rRNA sequences produced by highly parallel pyrosequencers. *Nucleic acids research* **36**, e120–e120 (2008).
54. Schloss, P. D., Gevers, D. & Westcott, S. L. Reducing the effects of PCR amplification and sequencing artifacts on 16S rRNA-based studies. *PloS one* **6**, e27310 (2011).
55. He, Y., Zhou, B.-J., *et al.* Comparison of microbial diversity determined with the same variable tag sequence extracted from two different PCR amplicons. *BMC microbiology* **13**, 1–8 (2013).
56. Claesson, M. J., Wang, Q., *et al.* Comparison of two next-generation sequencing technologies for resolving highly complex microbiota composition using tandem variable 16S rRNA gene regions. *Nucleic acids research* **38**, e200–e200 (2010).
57. Caporaso, J. G., Lauber, C. L., *et al.* Global patterns of 16S rRNA diversity at a depth of millions of sequences per sample. *Proceedings of the national academy of sciences* **108**, 4516–4522 (2011).
58. Auer, L., Mariadassou, M., O'Donohue, M., Klopp, C. & Hernandez-Raquet, G. Analysis of large 16S rRNA Illumina data sets: Impact of singleton read filtering on microbial community description. *Molecular ecology resources* **17**, e122–e132 (2017).
59. Callahan, B. J., McMurdie, P. J., *et al.* DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data. *Nature methods* **13**, 581–583 (2016).
60. Edgar, R. C. UNOISE2: improved error-correction for Illumina 16S and ITS amplicon sequencing. *BioRxiv*, 081257 (2016).
61. Szoboszlai, M., Schramm, L., *et al.* Nanopore is preferable over Illumina for 16S amplicon sequencing of the gut microbiota when species-level taxonomic classification, accurate estimation of richness, or focus on rare taxa is required. *Microorganisms* **11**, 804 (2023).
62. Chao, A. Nonparametric estimation of the number of classes in a population. *Scandinavian Journal of statistics*, 265–270 (1984).
63. Chao, A. & Lee, S.-M. Estimating the number of classes via sample coverage. *Journal of the American statistical Association* **87**, 210–217 (1992).
64. Willis, A. & Bunge, J. Estimating diversity via frequency ratios. *Biometrics* **71**, 1042–1049 (2015).
65. Urban, L., Holzer, A., *et al.* Freshwater monitoring by nanopore sequencing. *Elife* **10**, e61504 (2021).
66. Delahaye, C. & Nicolas, J. Sequencing DNA with nanopores: Troubles and biases. *PloS one* **16**, e0257521 (2021).
67. Amarasinghe, S. L., Su, S., *et al.* Opportunities and challenges in long-read sequencing data analysis. *Genome biology* **21**, 30 (2020).
68. Winand, R., Bogaerts, B., *et al.* Targeting the 16s rRNA gene for bacterial identification in complex mixed samples: Comparative evaluation of second (illumina) and third (oxford nanopore technologies) generation sequencing technologies. *International journal of molecular sciences* **21**, 298 (2019).
69. Yoon, S.-H., Ha, S.-M., *et al.* Introducing EzBioCloud: a taxonomically united database of 16S rRNA gene sequences and whole-genome assemblies. *International journal of systematic and evolutionary microbiology* **67**, 1613–1617 (2017).
70. Rodríguez-Pérez, H., Ciuffreda, L. & Flores, C. NanoCLUST: a species-level analysis of 16S rRNA nanopore sequencing data. *Bioinformatics* **37**, 1600–1601. doi:10.1093/bioinformatics/btaa900. eprint: <https://academic.oup.com/bioinformatics/article-pdf/37/11/1600/50361068/btaa900.pdf> (Oct. 2020).
71. Rodríguez-Pérez, H., Ciuffreda, L. & Flores, C. NanoRTax, a real-time pipeline for taxonomic and diversity analysis of nanopore 16S rRNA amplicon sequencing data. *Computational and Structural Biotechnology Journal* **20**, 5350–5354. doi:<https://doi.org/10.1016/j.csbj.2022.09.024> (2022).
72. Curry, K. D., Wang, Q., *et al.* Emu: species-level microbial community profiling of full-length 16S rRNA Oxford Nanopore sequencing data. *Nature methods* **19**, 845–853 (2022).
73. Andrews, S. *et al.* FastQC: a quality control tool for high throughput sequence data 2010.
74. De Coster, W. & Rademakers, R. NanoPack2: population-scale evaluation of long-read sequencing data. *Bioinformatics* **39**, btad311. doi:10.1093/bioinformatics/btad311. eprint: <https://academic.oup.com/bioinformatics/article-pdf/39/5/btad311/50394865/btad311.pdf> (May 2023).
75. Chen, S., Zhou, Y., Chen, Y. & Gu, J. fastp: an ultra-fast all-in-one FASTQ preprocessor. *Bioinformatics* **34**, i884–i890 (2018).
76. Ewels, P., Magnusson, M., Lundin, S. & Käller, M. MultiQC: summarize analysis results for multiple tools and samples in a single report. *Bioinformatics* **32**, 3047–3048 (2016).
77. Douglas, G. M., Maffei, V. J., *et al.* PICRUSt2 for prediction of metagenome functions. *Nature biotechnology* **38**, 685–688 (2020).
78. Segata, N., Izard, J., *et al.* Metagenomic biomarker discovery and explanation. *Genome biology* **12**, 1–18 (2011).

79. Dixon, P. VEGAN, a package of R functions for community ecology. *Journal of vegetation science* **14**, 927–930 (2003).
80. Shen, W. & Ren, H. TaxonKit: A practical and efficient NCBI taxonomy toolkit. *Journal of Genetics and Genomics* **48**. Special issue on Microbiome, 844–850. doi:https://doi.org/10.1016/j.jgg.2021.03.006 (2021).
81. Di Tommaso, P., Chatzou, M., *et al.* Nextflow enables reproducible computational workflows. *Nature biotechnology* **35**, 316–319 (2017).
82. *Anaconda Software Distribution* version Vers. 23.9.0. 2024.
83. Kurtzer, G. M., Sochat, V. & Bauer, M. W. Singularity: Scientific containers for mobility of compute. *PloS one* **12**, e0177459 (2017).