

Vasyl Druchkiv, MSc.

# Implementació d'una eina en R/Shiny per a l'anàlisi de significació biològica utilitzant l'anàlisi de les rutes

## Memoria del treball

per aconseguir el títol de

Master universitari en

Bioinformàtica i bioestadística

entregat a

**Universitat oberta de Catalunya**

Supervisat per Dr. Alexandre Sánchez Pla (UB)

València, Maig 2019



# Abstract

This is a placeholder for the abstract. It summarizes the whole thesis to give a very short overview. Usually, this the abstract is written when the whole thesis text is finished.



# Contingut

<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>1 Introducció</b>	<b>1</b>
1.1 Objectius . . . . .	2
1.1.1 Objectius generals . . . . .	2
1.1.2 Objectius específics . . . . .	2
<b>2 El marc teòric</b>	<b>5</b>
2.1 Les dades d'expressió genètica . . . . .	5
2.2 Annotació dels gens . . . . .	9
2.2.1 Gene ontology . . . . .	9
2.2.2 KEGG . . . . .	10
2.2.3 Reactome . . . . .	10
2.3 ORA . . . . .	11
2.4 GSEA . . . . .	12
2.5 L'anàlisi topològic de les rutes . . . . .	14
2.5.1 El mapa d'enriquement . . . . .	15
2.5.2 Gene-Concept-Network . . . . .	15
2.5.3 GOpot . . . . .	15
2.5.4 KEGG Pathway . . . . .	16
2.5.5 Reactome Pathway . . . . .	17
2.6 Desenvolupament del protocol . . . . .	17
<b>3 Tractament bioinformàtic</b>	<b>21</b>
3.1 Cerca dels paquets de Bioconductor . . . . .	21
3.2 Instal·lació de l'aplicació . . . . .	22

## Contingut

<b>4 L'aplicació</b>	<b>25</b>
4.1 ORA . . . . .	29
4.1.1 GO . . . . .	29
4.1.2 KEGG . . . . .	31
4.2 GSEA . . . . .	33
4.2.1 GO . . . . .	33
4.2.2 KEGG . . . . .	33
4.2.3 Reactome . . . . .	34
4.2.4 Bar-Plots . . . . .	35
4.2.5 Dot-Plots . . . . .	36
4.2.6 Enrichment Plots . . . . .	38
4.2.7 Category-Gene-Network Plot . . . . .	39
4.2.8 GSEA Plot . . . . .	39
4.3 L'anàlisi específic de GO, KEGG i Reactome . . . . .	41
4.3.1 GO Plot . . . . .	41
4.3.2 KEGG Pathway . . . . .	42
4.3.3 Reactome Pathway . . . . .	43
4.4 Manual i les ajudes del programa . . . . .	43
<b>5 Validació dels resultats</b>	<b>49</b>
5.1 Exemple d'anàlisi 1. GEO: GSE100924 . . . . .	50
<b>6 Discussió</b>	<b>61</b>
<b>Bibliography</b>	<b>65</b>

# Llista de les imatges

2.1	El procès d'anàlisi de microarrays . . . . .	6
2.2	El procès d'anàlisi de les rutes . . . . .	7
2.3	El mètode GSEA . . . . .	13
2.4	L'anotació de les relacions dins de les rutes KEGG . . . . .	16
2.5	Lucidchart per a l'aplicació . . . . .	18
4.1	Pàgina d'entrada . . . . .	26
4.2	Resum de les dades pujades . . . . .	27
4.3	Els elements de les seccions d'anàlisi . . . . .	29
4.4	Especificació d'ORA dels termes GO . . . . .	30
4.5	El resultat d'anàlisi ORA. GO. . . . .	31
4.6	Configuració d'anàlisi KEGG . . . . .	31
4.7	El resultat de l'anàlisi ORA. KEGG. . . . .	32
4.8	El resultat d'anàlisi ORA. Reactome. . . . .	32
4.9	El resultat de l'anàlisi GSEA. GO. . . . .	33
4.10	El resultat de l'anàlisi GSEA. KEGG. . . . .	34
4.11	El resultat d'anàlisi GSEA. Reactome. . . . .	35
4.12	Bar-Plot. GO. . . . .	36
4.13	Bar-Plot. GO. . . . .	37
4.14	Bar-Plot. GO. . . . .	38
4.15	Category-Gene-Network Plot. GO. . . . .	39
4.16	GSEA Plot. GO. . . . .	40
4.17	GO Plot . . . . .	41
4.18	KEGG pathway . . . . .	42
4.19	Reactome pathway . . . . .	43
4.20	Manual per a aplicació . . . . .	44
4.21	Manual per a l'anàlisi ORA amb l'anotació KEGG . . . . .	44
4.22	Senyals d'ajuda . . . . .	45
4.23	Ajuda per a l'elecció de l'espècie . . . . .	46

## Llista de les imatges

4.24 Ajuda per pujar les dades . . . . .	46
4.25 Infromació per la interpretació d'anàlisi ORA . . . . .	47
4.26 L'ajuda per a la selecció del mètode d'ajustament . . . . .	47
4.27 Ajuda per la interpretació de GSEA . . . . .	48
5.1 Selecció d'espècie . . . . .	50
5.2 Selecció d'espècie . . . . .	51
5.3 Resultat d'anàlisi ORA de Reactome . . . . .	51
5.4 Gràfic de barres . . . . .	52
5.5 Gràfic de punts . . . . .	53
5.6 Mapa d'enriquement . . . . .	54
5.7 Red de les categories i gens . . . . .	55
5.8 Rutes Reactome . . . . .	56
5.9 Anàlisi GSEA . . . . .	57
5.10 Gràfic GSEA . . . . .	57
5.11 Anàlisi ORA de KEGG . . . . .	58
5.12 Gràfic de les rutes KEGG . . . . .	58
5.13 L'anàlisi ORA de GO . . . . .	59

# 1 Introducció

El treball consistirà en el desenvolupament d'una aplicació per dur a terme l'anàlisi de les rutes (*Pathway analysis*). Amb les rutes entenem un conjunt de gens que actuen junts per dur a terme un procès biològic. Així doncs aquesta anàlisi permet donar més sentit a una expressió genètica diferencial entre les proves biològiques d'interès. Recordem que recents avenços tecnològics permeten mesurar els nivells d'expressió en una gran quantitat de gens, cosa que implica una gran quantitat de dades. Al nivell dels gens individuals es poden fer servir mètodes estadístics per comprovar si les diferències en les expressions entre els grups (provees biològiques) són estadísticament significatives. Per dotar encara de més sentit aquesta anàlisi és necessari agregar els resultats al nivell més raonable com ara al nivell de les rutes. Al final el que volem és comprovar si hi ha diferències estadísticament significatives entre les provees no al nivell dels gens particulars sinó al nivell de les rutes. Tan com en el cas dels gens particulars també en el nivell de les rutes s'han desenvolupat mètodes estadístics específics [Khatri et al., 2012]. En aquest treball vull analitzar quins mètodes són i quins tenen més avantatges que d'altres. A part d'aquest component més biològic i teòric del treball he buscat la possibilitat d'implementar aquests mètodes d'anàlisi en una aplicació intuitiva i d'un ús fàcil a la qual qualsevol científic que no disposi dels coneixements informàtics suficients per fer aquesta anàlisi podrà accedir gratuïtament. La plataforma que he utilitzat per crear l'aplicació és l'eina Shiny de Rstudio [Chang et al., 2018]. La feina ha consistit en la cerca dels paquets de Bioconductor que inclouen els mètodes per l'anàlisi de les rutes, selecció dels paquets més apropiats i la seva integració en una aplicació Shiny amb una interfície atractiva.

La justificació d'aquest tema ve de dues fonts diferents: d'una banda tinc un interès personal i d'altra banda entenc la importància de la meva aportació per a la comunitat científica. El meu interès personal és degut al fet que

## 1 Introducció

durant el màster he fet servir àmpliament el programa R però no he arribat a conèixer bé la creació d'una aplicació estadística amb Shiny. Per completar aquesta deficiència i entenent que aquesta eina és útil per al meu desenvolupament professional he buscat el tema que en requeria l'ús. Encara que hi ha algunes aplicacions de Shiny relacionats amb l'anàlisi de les rutes<sup>1</sup> i tanbé en altres plataformes [Reimand et al., 2019], elles no representen tota la diversitat dels paquet disponibles a Bioconductor. L'ús d'aquests paquets queda restringit per a experts en informàtica i estadística i per tant són difícilment accessibles per la gran part de la comunitat científica, de modo que seria convenient donar-hi més accessibilitat via una aplicació amb interfíci visual.

### 1.1 Objectius

Entre els objectius del treball podem distingir els general i els més específics:

#### 1.1.1 Objectius generals

1. Identificar els objectius i mètodes de l'anàlisi de les rutes (Bio/Stat)
2. Identificar els paquets de Bioconductor en R que s'aproximin als mètodes (Info)
3. Desenvolupar l'aplicació Shiny amb els paquets escollits per aproximar el resultat als objectius de l'anàlisi de les rutes (Info)

#### 1.1.2 Objectius específics

1. Biologia/Estadística
  - a) Buscar literatura sobre l'anàlisi de rutes
    - Quins mètodes hi ha? Enumerar-los i explicar-los, especialment els tests estadístics.

---

<sup>1</sup>Algunes splicacions existents de Shiny són: iDINGO [Class et al., 2017], ShinyGO [Ge and Jung, 2018], PAEA [Clark et al., 2015]

## 1.1 Objectius

- Quines bases de dades es fan servir?
  - Determinar les opcions per visualitzar els resultats de l'anàlisi de les rutes.
- b) Identificar les aplicacions existents i investigar què ofereixen
- c) Analitzar els vignettes dels paquets de Bioconductor i provar-ne el seu ús localment amb R

### 2. Informàtics

- a) Crear i documentat un protocol (pipeline) de l'anàlisi utilitzant els paquets seleccionats.
- b) Identificar les dades experimentals per passar-les pel pipeline creat
- c) Fer proves amb les dades seleccionades
- d) Fer canvis en el protocol si és necessari
- e) Integrar el pipeline a l'aplicació Shiny

Com es pot entendre dels objectius la feina ha consistit d'una banda en l'anàlisi teòrica dels mètodes disponibles actualment per a l'anàlisi de rutes, i d'altra banda en el desenvolupament d'una aplicació que incorporarà aquests mètodes. El mètode triat per aconseguir aquests objectius era el mètode simultani on la programació es desenvolupava alhora de l'anàlisi dels conceptes teòrics. D'aquesta manera he seguit auquests pasos:

1. Trobar un mètode teòric que proporcioni un resultat interessant;
2. Buscar en Bioconductor aquest mètode;
3. Repetir 1 i 2 fins que el conjunt dels mètodes facin l'anàlisi de les rutes complet.
4. Quan tots els mètodes són triats dissenyar un protocol;
5. Aplicar el protocol a les dades independents;
6. Comparar els resultats amb els estudis d'on provenen les dades;
7. Ajustar últimament el protocol;
8. Desenvolupar l'aplicació

S'ha d'emfatitzar el punt 5 i 6. Era essencial trobar les dades que s'utilitzin per fer les proves durant la fase de desenvolupament de *pipeline*. Les dades havien de provenir d'uns resultats ja publicats per poder comparar-los amb els resultats obtinguts amb el programari elaborat.



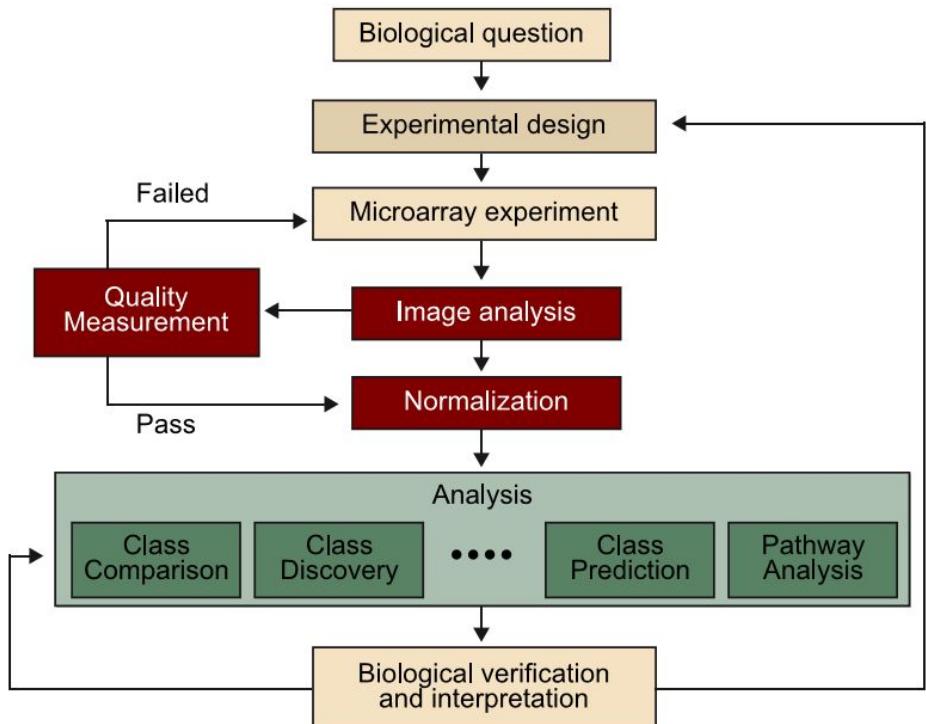
## 2 El marc teòric

### 2.1 Les dades d'expressió genètica

Les dades d'entrada per a l'anàlisi de les rutes provenen típicament de l'anàlisi de *microarrays* d'ADN, que produeix dades d'expressió de  $m$  gens (variables) per a  $n$  mARN mostres (observacions). Les dades com aquestes poden resultar d'un estudi d'investigació sobre efectes d'una proteïna com per exemple a l'estudi de [Li et al., 2017] on s'investiga la correlació entre la proteïna Zbtb7b (Zinc finger and BTB domain-containing protein 7B) i la formació de teixit adipós marró i beix i d'aquesta manera influex sobre fisiologia metabòlica. En aquest cas l'objectiu és comparar teixits de dos ratolins un de tipo salvatge i l'altre amb el gen ZBTB7B silenciat i investigar quins gens són diferencialment expressats entre aquests mostres biològiques.

Al gràfic següent veiem l'estructura habitual d'un experiment de *Microarray*.

## 2 El marc teòric



Imatge 2.1: El procès d'anàlisi de microarrays

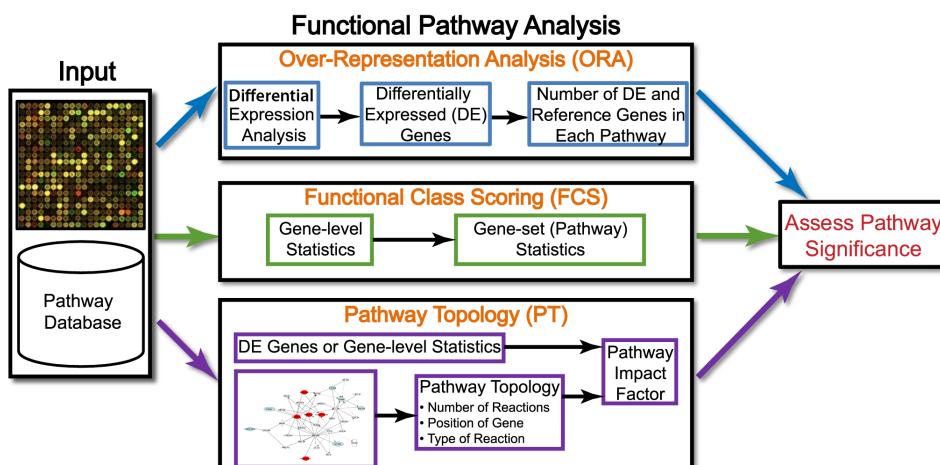
El *pipeline* de l'anàlisi consisteix doncs en plantejament d'una pregunta i un disseny experimental a partir del qual és fa l'experiment de *microarrays*. El producte d'experiment són bàsicament les imatges d'intensitats que es tradueixen als valors numèrics. Habitualment aquests valors són encara *raw values* i han de ser processats adequadament. Aquest processament inclou el control de qualitat d'imatges i la normalització dels valors d'intensitat per reduir la variabilitat tècnica. Finalment les dades normalitzades s'utilitzen per a l'anàlisi estadístic. Habitualment la mesura natural per comparar les mostres és el *log ratio* el qual podem denominar alternativament *logFC* on *FC* es refereix a *fold change*. Hi ha diversos tests estadístics per comprobar les diferències entre les mostres. En el cas de l'array d'un color podem fer servir tan els mètodes paramètrics com ara el test T o mètodes del modelatge lineal o bé mètodes nonparamètrics com ara la prova de Mann-Whitney.

## 2.1 Les dades d'expressió genètica

El test adequat dependrà bàsicament de la distribució de les dades. El resultat d'aquest ànalisi serveix com a base per a interpretació biològica dels resultats d'experiment. Per poder fer sentit de les dades d'expressió i de l'ànalisi estadístic al nivell de gens és imprescindible fer un ànalisi a nivell de les categories de gens o les rutes. Per aquest ànalisi es necessita, com ho veurem a l'apartat següent, una llista ordenada de les expressions relatives (*logFC*) i una subllista de gens que hem identificat mitjançant els tests estadístics com a diferencialment expressats.

En aquest treball m'ocupó de l'últim pas d'experiment d'escript, més específicament amb l'ànalisi de rutes (*Pathway analysis*).

La vista general de l'ànalisi de les rutes ofereix el gràfic següent:



Imatge 2.2: El procès d'ànalisi de les rutes

A part de les dades d'expressió, de les quals he parlat anteriorment, l'ànalisi requereix com a *input* també la base de dades de les rutes. De les dades que utilitzaré a la meva aplicació en parlaré a la secció següent. Per ara heis important entendre que els resultats d'expressió s'anoten a les bases de dades existents per comprobar si els gens sobre o sotaexpressats pertanyen a unes rutes específica. Per comprobar aquesta, o millor dit, aquestes hipòtesis (per que hi hauran hipòtesis múltiples) s'han establert tres grups dels mètodes:

## 2 El marc teòric

- **Over-Representation Analysis (ORA).** Aquest anàlisi necessita la preselecció dels gens diferencialment expressats (DE) i compara la freqüència dels gens de la ruta d'interès en la mostra dels gens diferencialment expressats i la freqüència dels gens de la ruta a la distribució de fons ([Boyle et al., 2004]).
- **Functional Class Scoring (FCS)** Per a aquesta anàlisi no necessitem cap preselecció dels gens diferencialment expressats (DE) sinó ja basta amb tenir les estadístiques a nivell de gens, que al cas de l'aplicació és el  $\log FC$ . Hi ha diversos mètodes que generen una estadística per a tot conjunt de gens d'una ruta i la comparen amb una distribució teòrica per a contrastar la hipòtesi nulla. Els mètodes es diferencien bàsicament en calculació de la puntuació d'enriquement que poden incluir l'estadística de Kolmogorov-Smornov, la suma, media o mediana d'estadístiques al nivell de gens etc. [Khatri et al., 2012]. O bé es poden diferenciar en calculació de la distribució teòrica: aquí alguns mètodes utilitzen la permutació de les mostres o de gens, cosa que implica dos hipòtesis diferents.
- **Pathway Topology (PT).** Aquest mètode enfoca la posició de gens diferencialment expressats en la ruta i d'aquesta manera utilitza el coneixement de les bases de dades més àmpliament. Per exemple, si una ruta està activada per un sol producte genètic o mitjançant un receptor i si aquesta proteïna particular no està produïda, la ruta estarà molt afectada, o fins i tot apagada. Més especificativament, si el receptor d'insulina no és en la ruta d'insulina ([https://www.genome.jp/dbget-bin/www\\_bget?hsa04910](https://www.genome.jp/dbget-bin/www_bget?hsa04910)) tota la ruta serà desactivada ([Tarca et al., 2008]). D'altra banda si un nombre de gens està involucrar en la ruta però apareixen riu abaux el seu efecte podria ser menys important. A més a més també el nombre de coneccions amb altres gens a la ruta podria ser important [Rahnenführer et al., 2004]. O fins i tot les estadístiques que incorporen factors diferents com ara la posició, el tipus d'interacció etc. [Draghici et al., 2007]. Aquesta idea l'he implementat en l'aplicació afegint les rutes dibuixades de KEGG i Reactome, on els gens estan emfatitzats d'acord amb els  $\log FCs$  obtinguts mitjançant l'experiment.

En els capítols següents presisaré més formal els mètodes d'ORA i GSEA i també descriuré algunes possibilitats per visualitzar les dependències de gens dins de les rutes específiques i també les relacions

## 2.2 Anotació dels gens

entre les rutes diferencialment expressades.

### 2.2 Anotació dels gens

Com veurem més endavant per a l'anàlisi de les rutes és imprescindible tenir com a referència anotacions dels gens. Per a aplicació he utilitzat tres bases de dades: Gene Ontology (GO), Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes i Reactome.

#### 2.2.1 Gene ontology

Gene Ontology [Consortium, 2004] dona tan un vocabulari estructurat i controlat (ontologies) com la classificació que cobreix alguns dominis de la biologia molecular i cel·lular. És una base de dades gratuïta per a anotació de gens, el seu producte i les seqüències. El projecte GO proporciona ontologies per a descriure els atributs dels productes de gens als tres dominis separats de la biologia molecular:

1. **Molecular Function (MF).** Aquest domini descriu activitats al nivell molecular. És important entendre que el terme “molecular function” representa més les activitats i no pas les entitats (com per exemple molècules o complexos) que fan aquestes accions i a més a més no espeifiquen quan o a quin context l’acció té lloc. Un exemple podria ser *catalytic activity* o un terme més específic *adenylate cyclase activity*.
2. **Biological Process (BP).** Aquest domini descriu els objectius biològics aconseguits per una o conjunt de les funcions moleculars. Un exemple d’un procès biològic ampli podria ser *DNA repair*. Un exemple més específic podria ser *pyrimidine nucleobase biosynthetic process*.
3. **Cellular Component (CC).** EL CC descriu l’emplaçaments al nivell d’estructures subcel·lulars (com *mitocondri*) i els complexos macromoleculars (com *ribosomes*) on el producte de gen fa la seva funció.

Dins de cada ontologia, els termens tenen tan una definició de text com un identificador únic. El vocabulari està estructurat en una classificació que manté les relacions “is-a” i “part-of” i “regulates”. Aquestes relacions les

## 2 El marc teòric

descriu amb més detall més endavant en la secció dedicada al gràfic acíclic de GO termes.

### 2.2.2 KEGG

La base de dades KEGG és la col·lecció del mapes dibuixades manualment que representen el coneixement sobre interacció molecular dividit en set dominis principals:

1. Metabolism
2. Genetic Information Processing
3. Environmental Information Processing
4. Cellular Processes
5. Organismal Systems
6. Human Diseases
7. Drug Development

Els mapes són dibuixades amb un software específic (KeggSketch) que genera un arxiu KGML+. Aquest arxiu és un arxiu SVG que conté els objectes gràfics que són associats amb els objectes KEGG. Els objectes gràfics bàsics de les rutes KEGG són:

- caixes: gens o el seu producte
- cercles: altres molècules
- línies: reaccions

El significat més detallat d'aquests elements el presentaré a la secció dedicada a les rutes KEGG.

### 2.2.3 Reactome

Reactome és una base de dades gratuïtament accessible i manualment curada per a reaccions i rutes biològiques. Al centre de Reactome són reaccions que es definexen com qualsevol esdeveniment molecular com ara unió, fosforilització, catàlisi bioquèmic, transport molecular o esdeveniments moleculars espontàni. Aquestes reaccions involucren qualsevol molècula,

## 2.3 ORA

però més típicament passen entre proteïnes i les molècules petites. Encara que els mapes de Reactome disponibles online contenen una relació entre les molècules més detallada el paquete de Bioconductor que utilitzaré per generar els mapes visualitza només la conecció bàsica entre els gens.

## 2.3 ORA

L'anàlisi de sobreexpressió és una tècnica d'identificació de les rutes significativament enriquides en la mostra d'interès.

El paper original que se cita habitualment quan es parla d'anàlisi d'expressió genètica és de [Boyle et al., 2004]. El mètode estadístic descrit consisteix bàsicament en els passos següents:

1. **De tots els gens de la mostra seleccionar un grup de gens que es considera que són significativament expressats.**

Els criteris de selecció poden basar-se en *log ratios* i/o en el valor de p provenint d'un test estadístic. *Log ratios* donen la magnitud amb la qual un gen és sobre o sotaexpressat. Les diferències entre els grups però són el resultat d'un procés estochàstic i per tant hem d'intentar de minimitzar el risc de prendre decisions falses. El valor de p representa la probabilitat d'aquest risc i per tant dona certa confiança sobre la significació de les diferències observades.

2. **Determinar si algunes rutes anoten la llista especificada de gens amb la freqüència més alta que la que s'esperaria per casualitat.**

El test estadístic es basa en la distribució hipergeomètrica:

$$p = 1 - \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\binom{M}{i} \binom{N-M}{n-i}}{\binom{N}{n}}$$

En aquesta equació  $N$  és el nombre total de gens en la distribució de fons,  $M$  és el nombre de gens dins d'aquesta distribució que són anotats a la ruta d'interès,  $n$  és el nombre total en la llista especificada de gens i  $k$  és el nombre de gens dins d'aquesta llista que són anotats a la ruta. La distribució de fons pot ser o bé tots els gens en la base de dades d'anotació o bé tots els gens de l'experiment.

## 2 El marc teòric

El valor de P obtingut amb aquesta fórmula dona la probabilitat de veure el nombre  $x$  de gens de la llista relacionats amb la ruta específica en la llista del nombre total de gens  $n$  donat la proporció de gens relacionats amb aquesta ruta en la distribució de fons.

L'aplicació utilitza aquesta idea i calcula una taula amb els camps següents:

- Description. El nom del terme GO;
- GeneRatio. El quocient  $\frac{M}{N}$  on  $M$  és el nombre dels gens diferencialment expressats que pertanyen al conjunt de gens i  $N$  és el nombre total dels gens diferencialment expressats
- BgRatio. El quocient:  $\frac{k}{n}$  on  $k$  és el nombre dels gens del conjunt d'interès en la distribució de fons i  $n$  és el nombre total dels gens en la distribució de fons;
- pvalue. Valor de p basat en la distribució hipergeomètrica descrita anteriorment.
- p.adjust. El valor de P ajustat. L'usuari pot seleccionar el mètode d'ajustament.

## 2.4 GSEA

Amb l'anàlisi GSEA podem analitzar els resultats d'un experiment d'expressió per a dos grups. Aquí els gens són ordenats basant-se en la correlació entre la seva expressió i la separació entre les classes. Aquest llistat ordenat  $L$  el podem crear utilitzant els *logRatios*.

Donat el conjunt definit dels gens  $S$ , que pertanyen per exemple al mateix terme de Gene Ontology, l'objectiu de GSEA és determinar si els membres de  $S$  són distribuïts aleatoriament en el  $L$  o es troben més al cap o a la cua. S'esperaria que els gens relacionats amb la separació fenotípica mostraran aquesta última distribució.

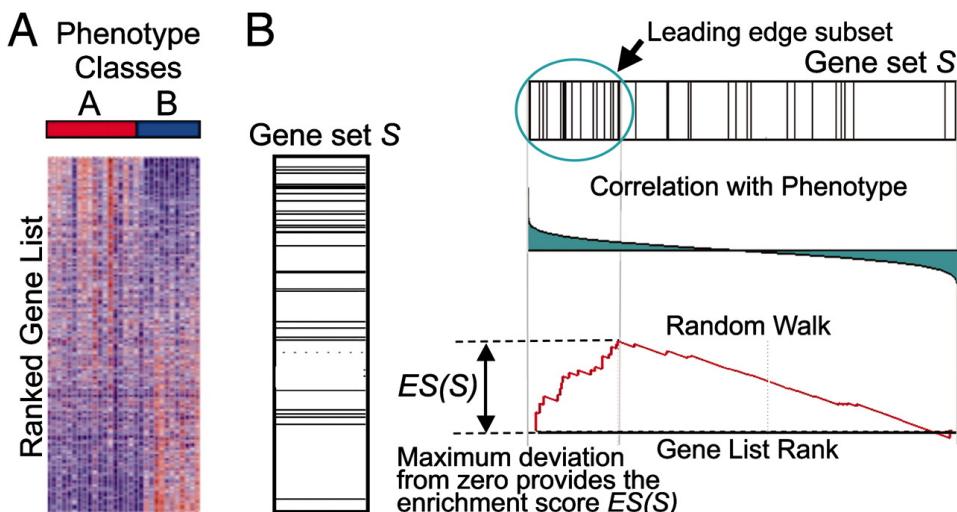
L'anàlisi GSEA consisteix en tres passos subramanian2005gene:

1. Càcul de la puntuació d'enriquement (*ES: Enrichment Score*). La puntuació està calculada anant per la llista i augmentant la suma corrent

## 2.4 GSEA

sempre quan es troba un gen que pertany a  $S$  o, al contrari, restant-la quan el gen no forma part del conjunt  $S$ . La puntuació és la desviació màxima del zero observada en aquet camí. L'estadística obtinguda és l'estadística de Kolmogorov-Smirnov amb pesos.

2. Estimació del nivell de significació per a la puntuació  $ES$ . El valor de  $P$  nominal es pot obtenir mitjançant o bé la permutació de les classes o bé la permutació de gens, on l'estadística  $ES$  observada es compara amb la distribució obtinguda amb permutació. Els dos modos de permutació comproven les hipòtesis diferents. Mentre la permutació de gens comprova la hipòtesi que *els gens en la ruta com a màxim són diferencialment expressats com els gens fora de la ruta*, la permutació de les mostres implica la hipòtesi que cap de gens en la ruta són diferencialment expressats. Es diferencies doncs en tractament de gens fora de la ruta. A l'aplicació es fa ús de la permutació de gens degut bàsicament a la selecció dels paquets de Bioconductor per a aplicació.
3. Càlcul del valor de  $P$  ajustat. El valor de  $P$  nominal s'ajusta per controlar l'error global que es produeix com a resultat de les comparacions múltiples.



Imatge 2.3: El mètode GSEA

L'aplicació que he desenvolupat agafa aquesta idea i calcula la taula que inclou les estadístiques següents:

## 2 El marc teòric

- enrichmentScore. Enrichment score per al conjunt dels gens. Amb altres paraules: el grau amb el qual el conjunt dels gens està sobre-expressat a dalt o a baix del llistat ordenat dels gens en les dades d'expressió.
- NES. Normalized enrichment score. La puntuació per al conjunt de gens després de ser normalitzat tenint en compte tots els conjunts de gens analitzats (la seva mida i la seva correlació amb les dades d'expressió). Aquesta puntuació ajuda a comparar els resultats entre els conjunts de gens.
- pvalue. El valor de p nominal.
- p.adjust. El valor de p ajustat.
- leading\_edge
  - Tags. El percentatge de les ocurrències de gens del conjunt específic abans (per als ES positius) o després (per als ES negatius) del cim en la puntuació corrent d'enriquiment. Aquest valor indica el percentatge dels gens que contribueixen a la puntuació d'enriquiment.
  - List. El percentatge dels gens en el llistat ordenat de tots els gens abans o després del pic en la puntuació corrent d'enriquiment. Aquest valor ens indica on exactament el pic es produeix.
  - Signal. La fortalesa del senyal d'enriquiment que combina els dos valors anteriors.
- rank. La posició del pic en la llista ordenada dels gens. Els conjunts dels gens més interessants assoleixen el seu màxim o bé al principi o al final de la llista ordenada. Vol dir que tenen aquest valor o bé molt baix o bé molt alt.

## 2.5 L'anàlisi topològic de les rutes

Tan ORA com GSEA no visualitzen les relacions entre les rutes i entre els gens dins de les rutes. Els avenços en anotació manual de les bases de dades disponibles (GO, KEGG i Reactome) contenen però aquesta informació i l'aplicació, gràcies al paquet `clusterProfiler`, hi treu l'avantatge i visualitza aquestes relacions més detalladament.

## 2.5 L'anàlisi topològic de les rutes

### 2.5.1 El mapa d'enriquement

Navegant a la categoria **Enrichment plot** l'usuari obté el mapa d'enriquiment. El mapa organitza les rutes en una xarxa amb les línies que connecten les rutes amb els gens solpats. D'aquesta manera les rutes amb gens en comú s'agrupen més a prop l'una de l'altra.

### 2.5.2 Gene-Concept-Network

L'anàlisi ORA no visualitza per si sola els gens que contribueixen al fet que la ruta sigui diferencialment expressada. Amb la xarxa de gens-concepte es pretén visualitzar els gens al voltant dels conceptes on els gens poden ser connectats amb les rutes (conceptes) diferents. D'aquesta manera es fa possible identificar les associacions biològiques més complexes entre les rutes mitjançant els gens.

### 2.5.3 GOplot

El gràfic de GO està organitzat com direccional acíclic gràfic (Directed Acyclic Graph). Una manera útil de veure els resultats és mirar com els termes GO estan distribuïts per aquest gràfic. L'aplicació ensenya el gràfic GO induït pels gens més significatius. El gràfic mostra tres relacions possibles entre les rutes:

1. *is a*: Si dèiem que A *is a* B, volem dir que A és un subtíp de B. Per exemple el cicle mitòtic de la cèl·lula *is a* cicle de la cèl·lula.
2. *part of*: Aquesta relació s'utilitza per representar la relació entre una part i el tot. Aquesta relació entre A i B existeix nomès si B és necessàriament una part d'A: quan B existeix, ho fa només com una part de B i la presència de B implica la presència d'A.
3. *regulates*: La relació descriu el cas on un procès afecta directament la manifestació de l'altre procès.

Els conceptes al llarg del gràfic són marcats amb color depenent si són estadísticament significatius o no.

## 2 El marc teòric

### 2.5.4 KEGG Pathway

Aquest gràfic mostra les relacions entre els gens dins de la ruta específica. Els gens són remarcats amb el color dependent de l'expressió diferencial mesurada amb LogRatios. Per poder interpretar el gràfic és útil tenir present l'anotació següent:

Notation	Objects	Arrows
	gene product, mostly protein but including RNA	→ molecular interaction or relation
○	chemical compound, DNA and other molecule	→ link to/from another map
[ ]	map	---> indirect link or unknown reaction /→ missing interaction (eg., by mutation) → drug structure link or pointer used to add legend
	Protein-protein interactions	Gene expression relations
+p	phosphorylation	[ ] → ○ → [ ] expression
-p	dephosphorylation	[ ] → ○ ← [ ] repression
+u	ubiquitination	[ ] → c → [ ] expression
-u	deubiquitination	[ ] → c ← [ ] repression
+g	glycosylation	
+m	methylation	
	activation	
	inhibition	
---	indirect effect or state change	
	binding / association	
	dissociation	
	complex	
		Enzyme-enzyme relations
		[ ] → ○ → [ ] → two successive reaction steps

Imatge 2.4: L'anotació de les relacions dins de les rutes KEGG

## 2.6 Desenvolupament del protocol

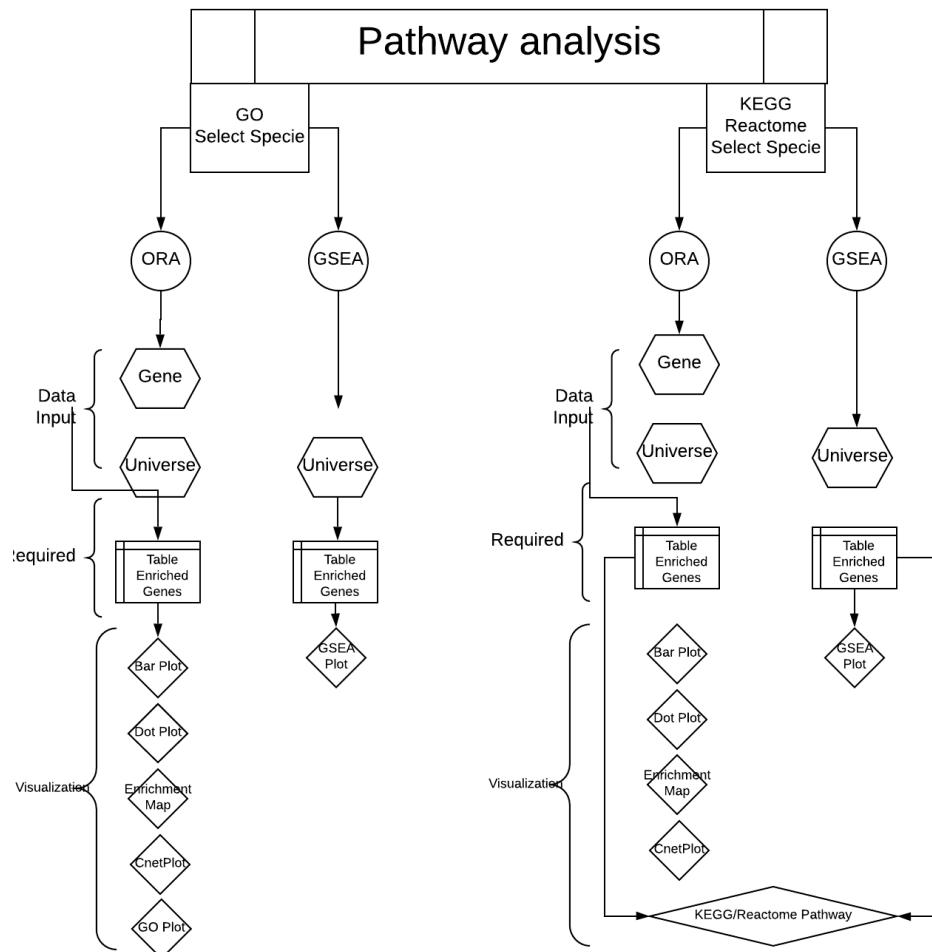
### 2.5.5 Reactome Pathway

En canvi a Goplot i les rutes KEGG les relacions entre els gens dins les rutes Reactome són més senzilles. Aquí les relacions són mostrades només amb les línies, on es pot interpretar només la distància entre els gens.

## 2.6 Desenvolupament del protocol

Crec que l'aplicació és molt intuitiva i deixa entreveure l'esquema següent:

## 2 El marc teòric



Imatge 2.5: Lucidchart per a l'aplicació

D'aquí podem definir per exemple el protocol:

1. Decidir quin ànalisi vol fer: GO, KEGG o Reactome
2. Seleccionar l'espècie de referència
3. Decidir quin mètode vol implementar: ORA o GSEA i respectivament pujar les dades necessàries.  
→ Per a ànalisi GO tots dos arxius són necessaris: Gens Seleccions (Gene) i Tots els gens (Universe).

## 2.6 Desenvolupament del protocol

→ Per a l'anàlisi KEGG o Reactome les dades necessàries varien: Pel mètode ORA l'arxiu amb els gens seleccionats és suficient. Dos arxius són necessaris pel mètode GSEA.

4. En el cas que volguem fer l'anàlisis ORA seleccionar a l'apartat corresponent (GO, KEGG o Reactome) la pestanya ORA i definir els criteris.

→ Els gràfics: Bar Plot, Dot Plot Enrichment Map, Cnet Plot, GO Plot (en cas d'anàlisi GO) i els gràfics de les rutes (KEGG/Reactome) es calculen automàticament

5. En el cas que volguem fer l'anàlisi GSEA seleccionar a l'apartat corresponent (GO, KEGG o Reactome) la pestanya GSEA i definir els criteris.

→ El gràfic GSEA es genera automàticament. Es pot elegir la ruta mitjançant un menú desplegable.



# 3 Tractament bioinformàtic

## 3.1 Cerca dels paquets de Bioconductor

El paquet `clusterProfiler` de Bioconductor integra els mètodes per dur a terme l'anàlisi de les rutes basant-se en les bases de dades GO, KEGG i Reactome. Els dos mètodes principals són ORA (Overrepresentation analysis) i GSEA (Gene set enrichment Analysis). També inclou les possibilitats de visualització dels resultats suficients per considerar l'anàlisi de les rutes complet. Notem però que el test de permutació a l'anàlisi GSEA implementat per `clusterPrifiler` es basa en la permutació dels gens i no de les mostres com originalment és proposat per [Subramanian et al., 2005].

Els paquets i les seves funcions per generar els resultats són els següents:

Base de dades	Mètode	Paquet Bioconductor	Funció	Observació
GO	ORA	<code>clusterProfiler</code>	<code>enrichGO()</code>	Només 7 espècies disponibles
GO	GSEA	<code>clusterProfiler</code>	<code>gseGO()</code>	Permutació de gens
GO	Bar-Plot	<code>enrichplot</code>	<code>barplot()</code>	Necessita l'objecte del class <code>enrichResult</code>
GO	Enrichment Map	<code>enrichplot</code>	<code>emapplot()</code>	Necessita l'objecte del class <code>enrichResult</code>
GO	Gene-Concept Network	<code>enrichplot</code>	<code>cnetplot()</code>	Necessita l'objecte del class <code>enrichResult</code>
GO	GO directed acyclic graph	<code>enrichplot</code>	<code>goplot()</code>	Necessita l'objecte del class <code>enrichResult</code>
KEGG	ORA	<code>clusterProfiler</code>	<code>enrichKEGG()</code>	Totes les espècies de KEGG
KEGG	GSEA	<code>clusterProfiler</code>	<code>gseKEGG()</code>	Permutació de gens
KEGG	Bar-Plot	<code>enrichplot</code>	<code>barplot()</code>	Necessita l'objecte del class <code>enrichResult</code>
KEGG	Enrichment Map	<code>enrichplot</code>	<code>emapplot()</code>	Necessita l'objecte del class <code>enrichResult</code>
KEGG	Gene-Concept Network	<code>enrichplot</code>	<code>cnetplot()</code>	Necessita l'objecte del class <code>enrichResult</code>
KEGG	Pathway	<code>pathview</code>	<code>pathview()</code>	Cal modificar la funció per guardar els gràfics en el directori temporal
Reactome	ORA	<code>ReactomePA</code>	<code>enrichPathway()</code>	Totes les espècies de KEGG
Reactome	GSEA	<code>ReactomePA</code>	<code>gsePathway()</code>	Permutació de gens
Reactome	Bar-Plot	<code>enrichplot</code>	<code>barplot()</code>	Necessita l'objecte del class <code>enrichResult</code>
Reactome	Enrichment Map	<code>enrichplot</code>	<code>emapplot()</code>	Necessita l'objecte del class <code>enrichResult</code>
Reactome	Gene-Concept Network	<code>enrichplot</code>	<code>cnetplot()</code>	Necessita l'objecte del class <code>enrichResult</code>
Reactome	Pathway	<code>ReactomePA</code>	<code>viewPathway()</code>	

Table 3.1: Resum de les analisis disponibles i recursos de Bioconductor R

### 3 Tractament bioinformàtic

## 3.2 Instal·lació de l'aplicació

La solució més plausible i ràpida era empaquetar tota l'aplicació dins d'un paquet R i fer-la disponible d'aquesta manera en el GitHub. Hi havia també dues opcions més:

- Publicar l'aplicació a CRAN
- Publicar l'aplicació en un servidor Shiny

La primera opció, publicació en CRAN, no l'he contemplat encara, perquè la solució no és immediata, sino que és un procès que no és fàcil i pot tardar fins que el paquet estigui publicat amb èxit. Com comenta [Wickham, 2015] “submitting to CRAN is a lot more work than just providing a version on github, but the vast majority of R users do not install packages from github, because CRAN provides discoverability, ease of installation and a stamp of authenticity. The CRAN submission process can be frustrating, but it's worthwhile...”. Normalment els paquets han d'estar en perfectes condicions abans d'entregar-los i seran revisats manualmet per un equip dels voluntaris. D'aquesta manera l'aplicació no seria available dins del marc temporal previst per al treball de màster. A més a més considero que podria millorar encara més l'aplicació abans d'entregar-lo.

La segona opció, publicació via Shiny Server, és molt interessant, però implicaria un treball considerable per configurar el servidor. Com que ho faria per primera vegada, no puc assegurar que tot estigui preparat a temps.

Per tant, el paquet PathwayApp es pot instal·lar del repositori GitHub seguint els passos següents:

1. Instal·lar, si encara no està fet, la versió actual de R;
2. Instal·lar, si encara no està fet, el Bioconductor;
3. Instal·lar, si encara no està fet, el paquet devtools

```
install.packages('devtools')
library(devtools)
```

4. Instal·lar el paquet PathwayApp

```
devtools::install_github("vdruchkiv/TFM/5_Packages/PathwayApp")
```

## 3.2 Instal·lació de l'aplicació

### 5. Iniciar l'aplicació

```
PathwayApp :: runPathwayApp()
```

La funció `runPathwayApp()` iniciarà la comprovació dels paquets necessaris i començarà l'aplicació. Els paquets següents seran instal·lats, si no ho són encara:

Paquet	Font
clusterProfiler	Bioconductor
ReactomePA	Bioconductor
pathview	Bioconductor
pathviewPatched	GitHub vdruchkiv/TFM
dplyr	CRAN
ggplot2	CRAN
knitr	CRAN
kableExtra	CRAN
formattable	CRAN
shiny	CRAN
shinydashboard	CRAN
shinyhelper	CRAN
shinycssloaders	CRAN



## 4 L'aplicació

Després d'instal·lació l'aplicació és completament funcional localment i ofereix l'anàlisi a partir de les bases de dades GO, KEGG i Reactome. A l'apartat **Input data** l'usuari primer ha d'indicar l'espècie per a totes tres bases de dades. Per les bases de dades de Reactome l'usuari pot elegir entre Homo Sapiens, Rat, Mouse, Celegans, Yeast, Zebrafish, Fly. Per a l'anàlisi GO, a més de les anteriors, hi ha disponibles aquestes espècies addicionals: Arabidopsis, Bovine, Chicken, Canine, Pig, Rhesus, E coli strain K12, Xenopus, Anopheles, Chimp, Malaria, E coli strain Sakai. Hi ha més espècies disponibles per a l'anàlisis KEGG, perquè la funció de `culsterProfiler enrichKEGG()` descarrega les últimes anotacions directament de la base de dades KEGG. Es poden trobar totes les espècies [aquí](#). També l'usuari pot buscar l'espècie introduint els termes de cerca. Finalment l'usuari puja l'arxiu amb els gens i els LogRatios provinents de l'estudi de *microarrays*.

## 4 L'aplicació

Imatge 4.1: Pàgina d'entrada

The screenshot shows the 'Pathway analysis' input page. On the left, a sidebar lists 'Data input' options: 'GO Analysis', 'KEGG Analysis', and 'Reactome Analysis'. The main area is divided into three sections: 'GO', 'Reactome', and 'KEGG'. Each section has a 'Select Specie:' dropdown set to 'Homo Sapiens'. In the 'KEGG' section, there is an 'Enter Search Term for Species' input field containing 'homo' and a 'Select KEGG Specie' dropdown also set to 'Homo sapiens'. Below these are two file upload fields: 'File with all genes' and 'File with selected genes', both currently showing 'No file selected'. A note at the bottom states: 'Note: The file should contain two columns, one for gene ID (no duplicated ID allowed) and another one for fold change.'

L'usuari té la possibilitat d'introduir l'arxiu amb tots els gens i els gens seleccionats. Un cop introduïdes les dades es mostra un petit resum del contingut dels arxius.

Imatge 4.2: Resum de les dades pujades

The screenshot shows a user interface for uploading gene lists. At the top, there are two sections: "File with all genes" and "File with selected genes". Both sections have a "Browse..." button, a file input field containing "Dose\_geneList.csv", and a blue progress bar indicating "Upload complete".

Below these sections, a note states: "Note: The file should contain two columns, one for gene ID (no duplicated ID allowed) and another one for fold change."

Under the "File with all genes" section, it says "You uploaded: 12495 genes" and shows the first 10 entries of a table:

Entrez ID	FoldChange
4312	4.573
8318	4.515
10874	4.418
55143	4.144
55388	3.876
991	3.678
6280	3.502
2305	3.292
9493	3.286
1062	3.220

Under the "File with selected genes" section, it says "You selected: 207 genes" and shows the first 10 entries of a table:

Entrez ID	FoldChange
...	...
...	...
...	...
...	...
...	...
...	...
...	...
...	...
...	...

L'aplicació està dividida doncs en 4 parts substancials:

1. Entrada de les dades;
2. Anàlisi GO;
3. Anàlisi KEGG;
4. Anàlisi Reactome.

L'aplicació ofereix dos mètodes d'anàlisi: d'una banda es pot fer ORA (Over-Representation Analysis) i d'altra banda l'anàlisi GSEA (Gene Set Enrichment Analysis). Recordem que l'ORA consisteix a seleccionar els gens

## 4 L'aplicació

diferencialment expressats i basant-se en GO, KEGG o Reactome comprovar si una de les agrupacions de gens suggerides per aquestes bases de dades està sobre o sotraexpressada en els gens seleccionats. Per dur a terme l'ORA l'usuari té l'opció de definir un *cut-off* de Log-Ratio per formar el conjunt dels gens que s'hi utilitzarà (*gene set*). ORA és una bona eina per veure els efectes grans però els efectes petits se li escapen. Els efectes petits derivats dels gens individuals poden acumular-se en un efecte conjunt substancial el qual ORA no serà capaç de detectar. És aquí on GSEA mostra la seva utilitat.

Els apartats d'anàlisi (GO, KEGG i Reactome) ofereixen tan representacions comunes com representacions específiques.

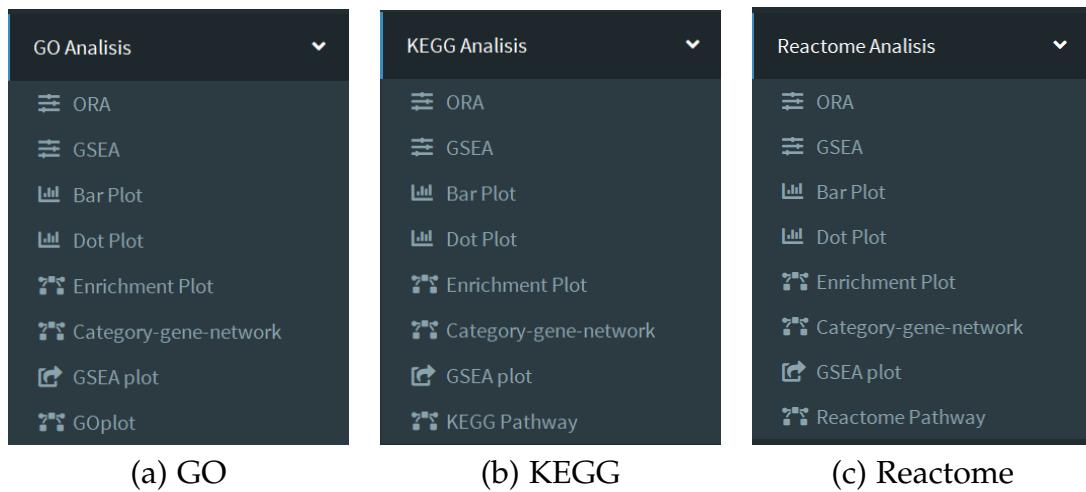
Els análisis i representacions en comú són:

- Taula dels resultats ORA;
- Taula dels resultats GSEA;
- Gràfic de barres del resultat ORA;
- Gràfic de punts del resultat ORA;
- El mapa d'enriquement (Enrichment Map);
- La xarxa dels gens en categories (Category-gene-network);
- El gràfic de GSEA.

Les análisis específics són:

- GO → Gràfic GO
- KEGG → Rutes de la base de dades KEGG
- Reactome → Rutes de la base de dades Reactome

## 4.1 ORA



Imatge 4.3: Els elements de les seccions d'anàlisi

## 4.1 ORA

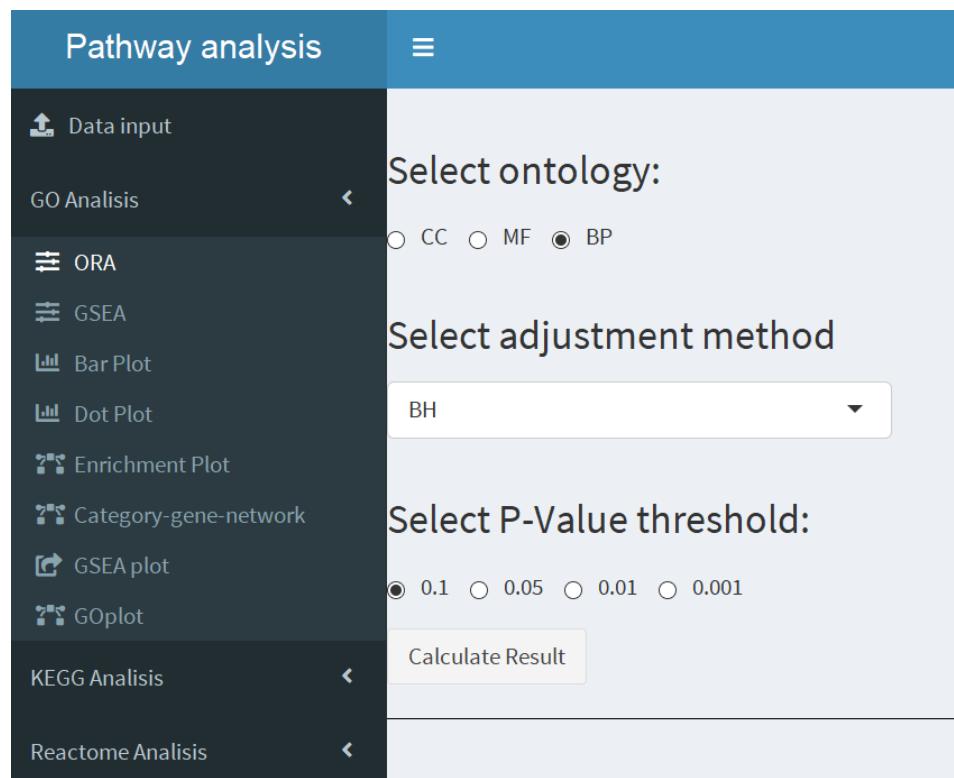
### 4.1.1 GO

Per realitzar l'anàlisi ORA per a termes GO s'utilitza la funció `enrichGO` del paquet `clusterProfiler`.

He implementat els valors per defecte amb la possibilitat per a l'usuari d'elegir entre:

- Ontologies GO
  - Molecular function, Biological proces, Cellular Components;
- Nivell de significació basant-se en els valors de P ajustats
  - 0.1, 0.05, 0.01, 0.001;
- Mètode d'ajustament
  - Holm; Hochberg; Hommel; Bonferroni; BH; BY; FDR; None.

## 4 L'aplicació



Imatge 4.4: Especificació d'ORA dels termes GO

L'execució de la funció és un procès temporalment costós. Per aquest motiu he afegit el botó d'acció, en lloc de deixar la funció reactiva. D'aquesta manera l'usuari ha de fer una decisió conscient de repetir l'anàlisi amb altres valors.

Prement el botó apareix la taula i el botó nou mitjançant el qual l'usuari pot descarregar els resultats en format .csv. He formatejat la taula amb els paquets knitr, kableExtra, formattable i dplyr. Amb els dos últims he afegit les barres de color pel nombre dels gens diferencialment expressats del terme específic de GO i la gradació de color del verd fins al vermell pels valors dels més petits fins els més grans.

## 4.1 ORA

ID	Description	GeneRatio	BgRatio	pvalue	p.adjust	qvalue	Count	genelD
GO:0140014	mitotic nuclear division	33/193	232/11468	0.000	4.00e-18	0.000	33	CDCA8/CDC20/KIF23/CENPE/MYBL2/CCNB2/t
GO:0000280	nuclear division	35/193	316/11468	0.000	4.50e-16	0.000	35	CDCA8/CDC20/KIF23/CENPE/MYBL2/CCNB2/t

imatge 4.5: El resultat d'anàlisi ORA. GO.

### 4.1.2 KEGG

Per l'ORA de base de dades KEGG he utilitzat la funció `enrichKEGG()` del paquet `clusterProfiler`.

The screenshot shows the 'Pathway analysis' section of the KEGG interface. On the left, there's a sidebar with various analysis options: Data input, GO Analysis, KEGG Analysis, ORA (which is selected), GSEA, Bar Plot, Dot Plot, Enrichment Plot, Category-gene-network, GSEA plot, KEGG Pathway, Reactome Analysis, and Reactome Pathway. The main panel has a blue header 'Pathway analysis'. Below it, there's a 'Select P-Value threshold:' section with radio buttons for 0.1, 0.05, 0.01, and 0.001, where 0.1 is selected. There's also a dropdown for 'Select adjustment method' set to 'holm'. At the bottom of the main panel is a 'Calculate Result' button.

imatge 4.6: Configuració d'anàlisi KEGG

Una vegada introduïts els paràmetres i premut el botó **Calculate** apareix el

## 4 L'aplicació

botó **Download .csv** i la taula previsualitzada. Els camps de la taula són els mateixos com en l'anàlisi dels termes GO.

ID	Description	GeneRatio	BgRatio	pvalue	p.adjust	qvalue	Count	geneID
hsa04110	Cell cycle	11/92	124/7841	0.000	3.48e-05	0.000	11	8318/991/9133/890/983/4085/7272/1111/891/4174/9232
hsa04114	Oocyte meiosis	10/92	125/7841	0.000	1.70e-04	0.000	10	991/9133/983/4085/51806/6790/891/9232/3708/5241
hsa04218	Cellular senescence	10/92	160/7841	0.000	1.04e-03	0.001	10	2305/4605/9133/890/983/51806/1111/891/776/3708

Imatge 4.7: El resultat de l'anàlisi ORA. KEGG.

## Reactome

En el cas de Reactome el procediment és similar. La funció usada és `enrich-Pathway()` del paquet `ReactomePA`:

ID	Description	GeneRatio	BgRatio	pvalue	p.adjust	qvalue	Count	geneID
R-HSA-2500257	Resolution of Sister Chromatid Cohesion	15/142	124/10554	0.000	7.83e-05	0.000	15	CDCA8/CDC20/CENPE/CCNB2/NDC80/SKA1/CENP
R-HSA-68877	Mitotic Prometaphase	18/142	198/10554	0.000	2.85e-05	0.000	18	CDCA8/CDC20/CENPE/CCNB2/NDC80/NCAPH/SK
R-HSA-69620	Cell Cycle Checkpoints	21/142	293/10554	0.000	1.30e-05	0.000	21	CDC45/CDCA8/MCM10/CDC20/CCNB2/NDC
R-HSA-	Mitotic Spindle	13/142	112/10554	0.000	4.03e-05	0.000	13	CDCA8/CDC20/CENPE/NDC80/UBE2C/SKA1/CENP

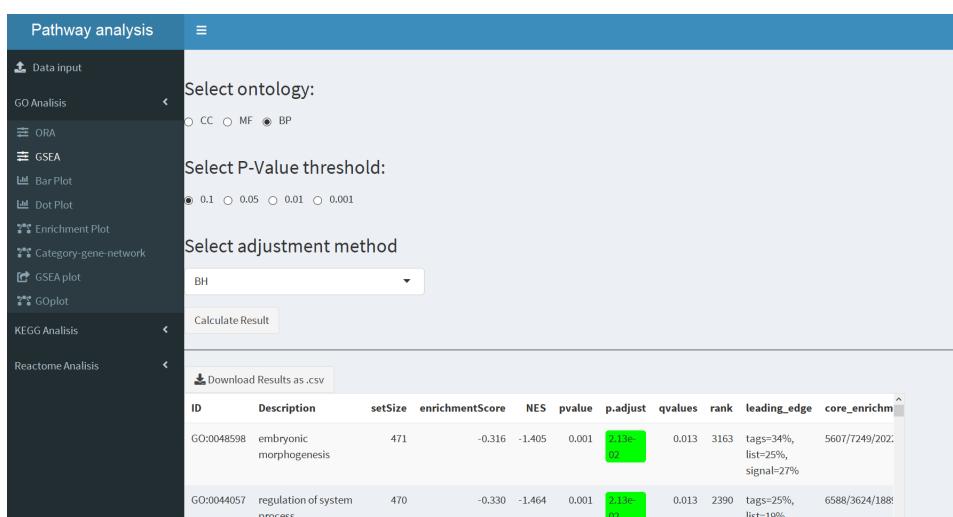
Imatge 4.8: El resultat d'anàlisi ORA. Reactome.

## 4.2 GSEA

### 4.2.1 GO

El mètode GSEA per a termes GO es calcula amb la funció `gseGO()` del paquet `clusterProfiler`.

L'usuari pot elegir l'ontologia GO, el *cut-off* del valor P i el mètode d'ajustament.

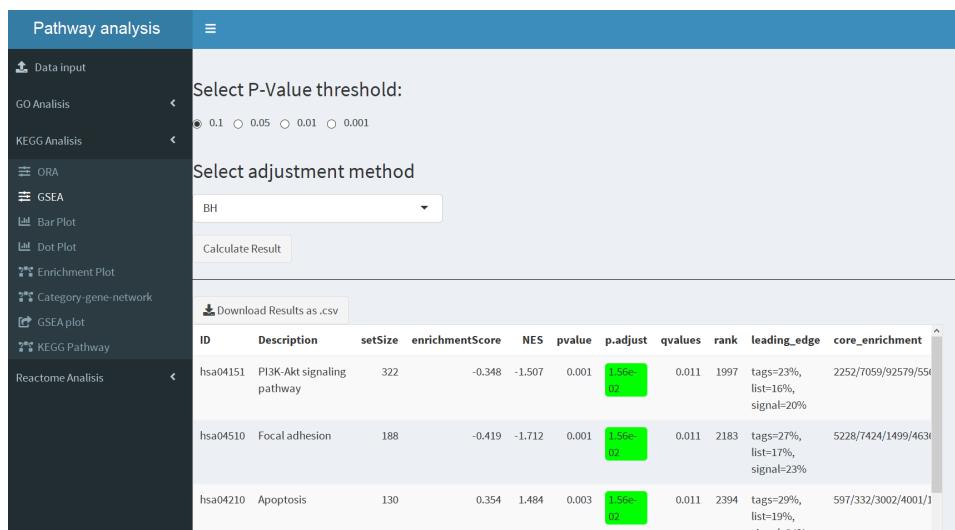


Imatge 4.9: El resultat de l'anàlisi GSEA. GO.

### 4.2.2 KEGG

De la mateixa manera es calcula GSEA amb la funció `gseKEGG()` del paquet `clusterProfiler`:

## 4 L'aplicació



Imatge 4.10: El resultat de l'anàlisi GSEA. KEGG.

### 4.2.3 Reactome

Per completar l'anàlisi l'usuari pot calcular GSEA per a base de dades Reactome. Com als altres casos utilitzo el paquet `clusterProfiler` i específicament la funció `gsePathway()`

## 4.2 GSEA

The screenshot shows the 'Pathway analysis' section of the GSEA software. On the left, a sidebar lists 'Data input' options: GO Analysis, KEGG Analysis, and Reactome Analysis. Under 'Reactome Analysis', 'GSEA' is selected, which is expanded to show 'Bar Plot', 'Dot Plot', 'Enrichment Plot', 'Category-gene-network', 'GSEA plot', and 'Reactome Pathway'. The main panel displays a table of enrichment results. At the top of this panel, there are dropdown menus for 'Select P-Value threshold' (set to 0.1) and 'Select adjustment method' (set to BH). A 'Calculate Result' button is also present. Below these, a 'Download Results as .csv' button is available. The table has columns: ID, Description, setSize, enrichmentScore, NES, pvalue, p.adjust, qvalues, rank, leading\_edge, and core\_enrichment. Three rows of data are shown:

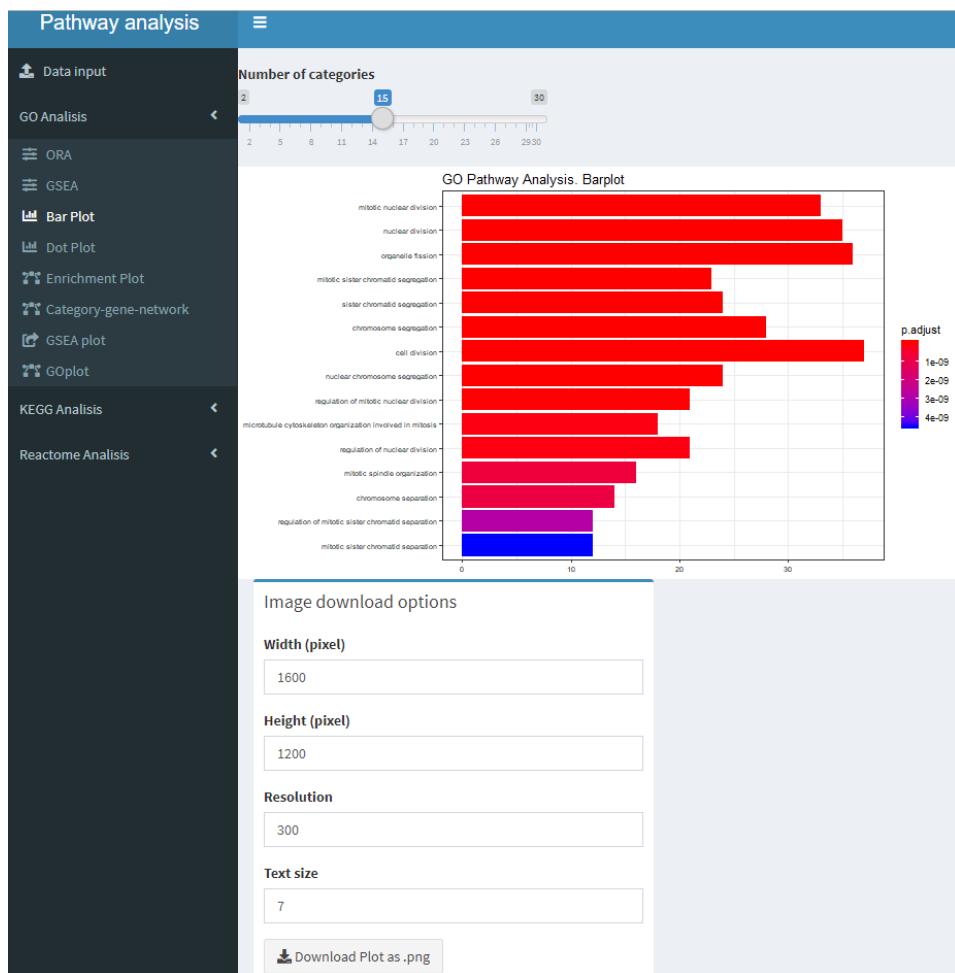
ID	Description	setSize	enrichmentScore	NES	pvalue	p.adjust	qvalues	rank	leading_edge	core_enrichment
R-HSA-9006934	Signaling by Receptor Tyrosine Kinases	416	-0.340	-1.489	0.001	1.52e-02	0.006	2788	tags=28%, list=22%, signal=22%	5580/2242/5802/9101
R-HSA-1474244	Extracellular matrix organization	266	-0.458	-1.922	0.001	1.23e-02	0.006	1943	tags=33%, list=16%, signal=29%	8038/11132/4017/128
R-HSA-5693538	Homology Directed Repair	102	0.558	2.283	0.003	1.32e-02	0.006	1990	tags=37%, list=16%, signal=32%	10635/890/1111/9156

Imatge 4.11: El resultat d'anàlisi GSEA. Reactome.

### 4.2.4 Bar-Plots

Els resultats de `enrichGO`, `enrichKEGG` i `enrichPathway` es poden visualitzar amb el gràfic de barres. L'usuari pot elegir el nombre de les categories visualitzades entre 2 i 30. Es dona l'opció per descarregar el gràfic en format `.png`.

## 4 L'aplicació

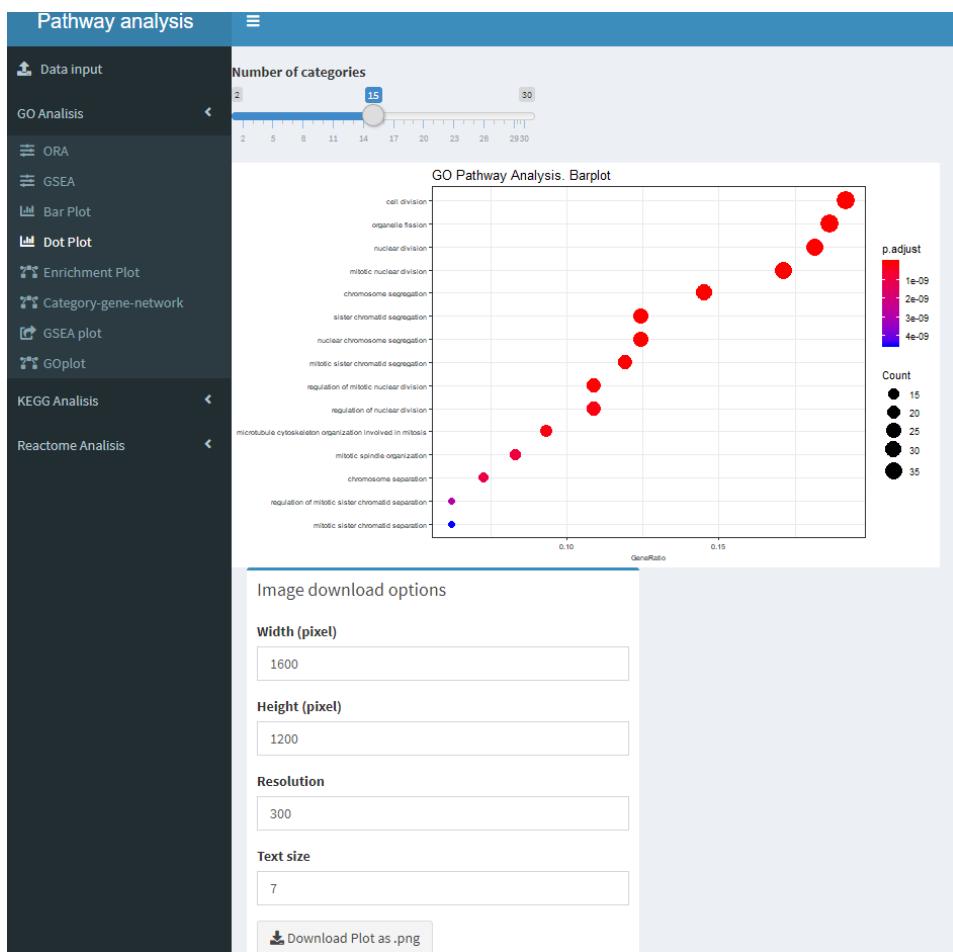


imatge 4.12: Bar-Plot. GO.

### 4.2.5 Dot-Plots

El *dot plot* visualitza addicionalment el *gen ratio*. També aquí l'usuari pot seleccionar el nombre de categories.

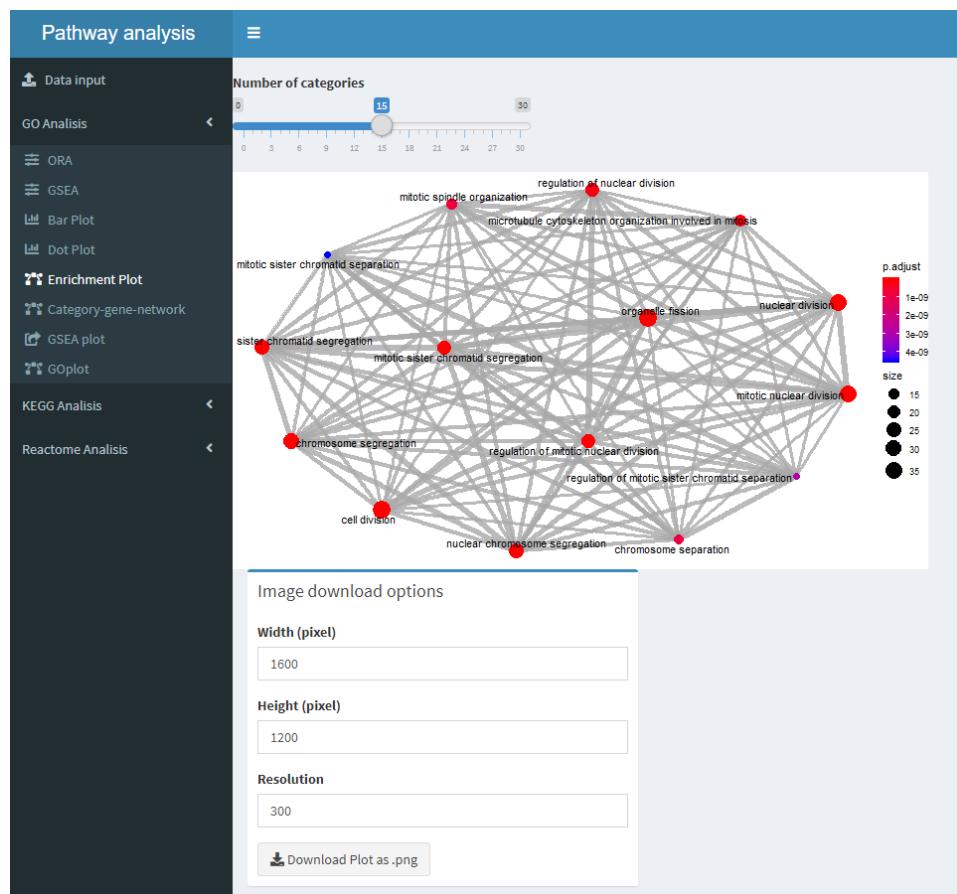
## 4.2 GSEA



Imatge 4.13: Bar-Plot. GO.

## 4 L'aplicació

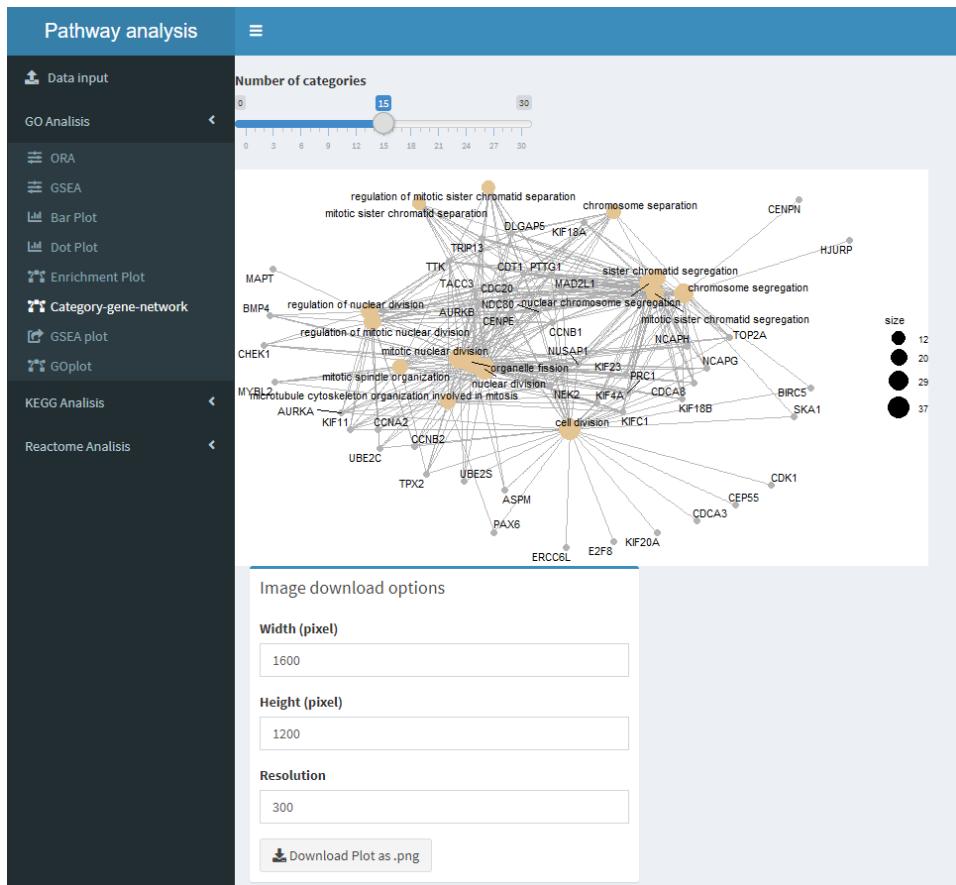
### 4.2.6 Enrichment Plots



imatge 4.14: Bar-Plot. GO.

## 4.2 GSEA

#### 4.2.7 Category-Gene-Network Plot

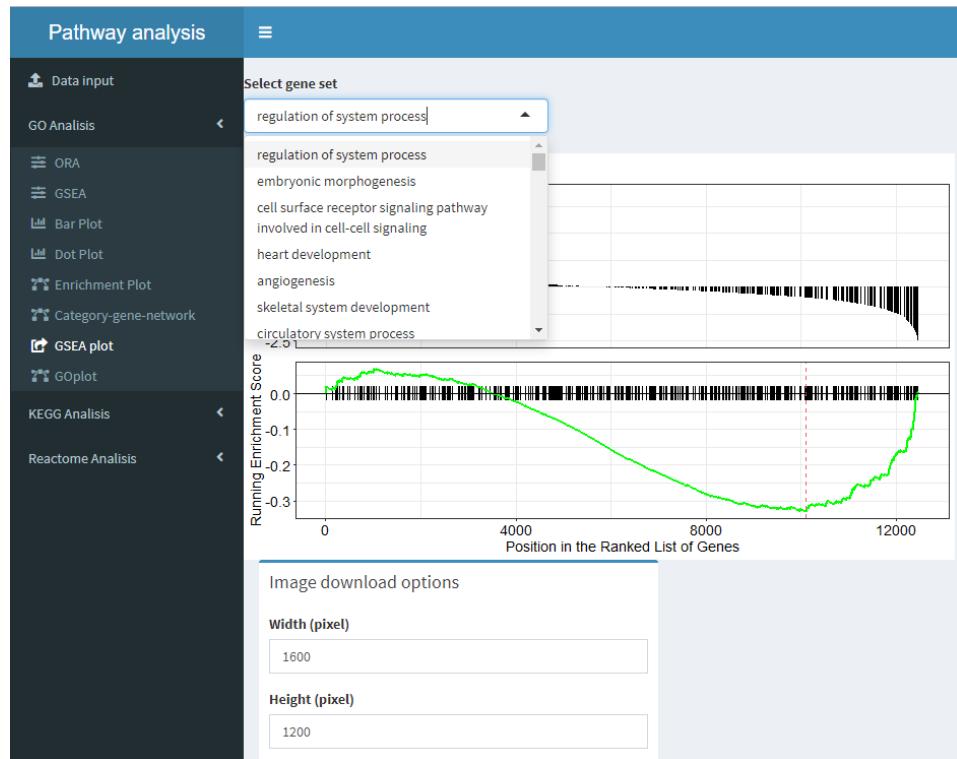


Imatge 4.15: Category-Gene-Network Plot. GO.

## 4.2.8 GSEA Plot

L'usuari pot visualitzar una de les categories disponibles via *dropdown list*. El llistat inclou totes les rutes generades durant l'anàlisi GSEA en els apartats *Go Analysis*→*GSEA*; *KEGG*→*GSEA*

## 4 L'aplicació

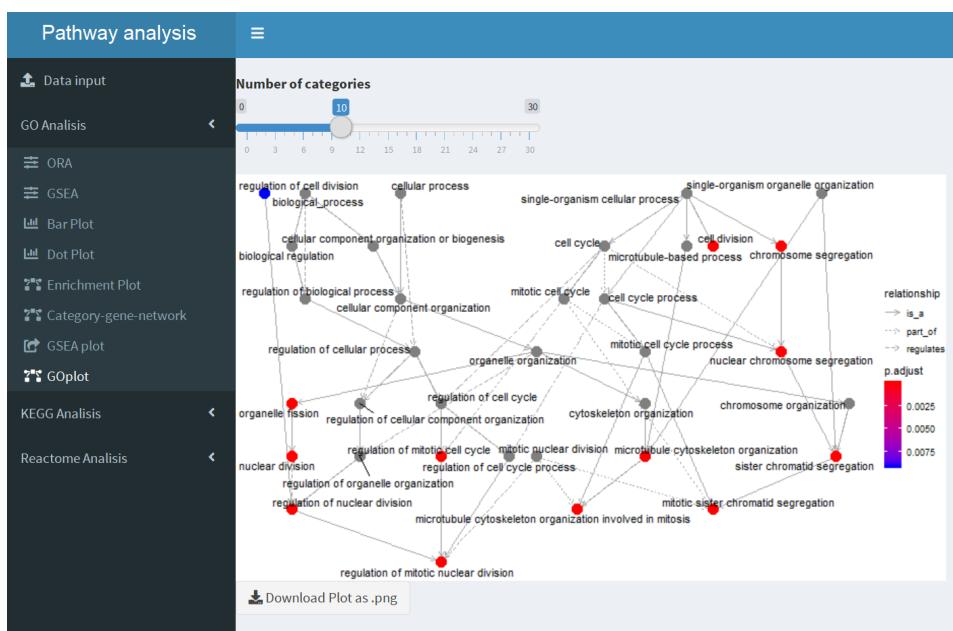


imatge 4.16: GSEA Plot. GO.

## 4.3 L'anàlisi específic de GO, KEGG i Reactome

### 4.3 L'anàlisi específic de GO, KEGG i Reactome

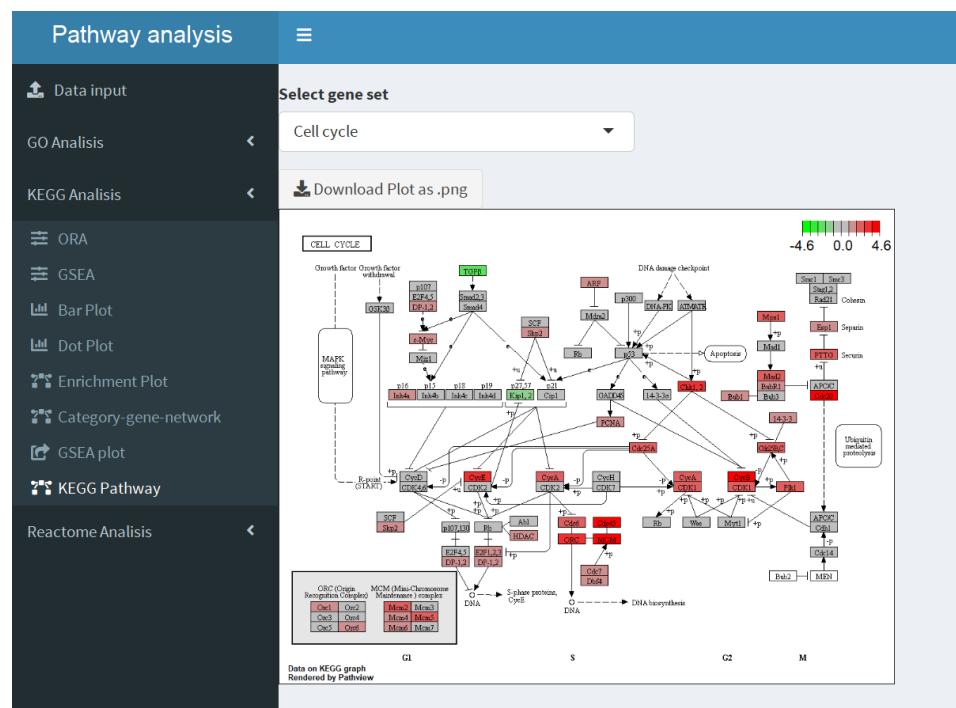
#### 4.3.1 GO Plot



Imatge 4.17: GO Plot

4 L'aplicació

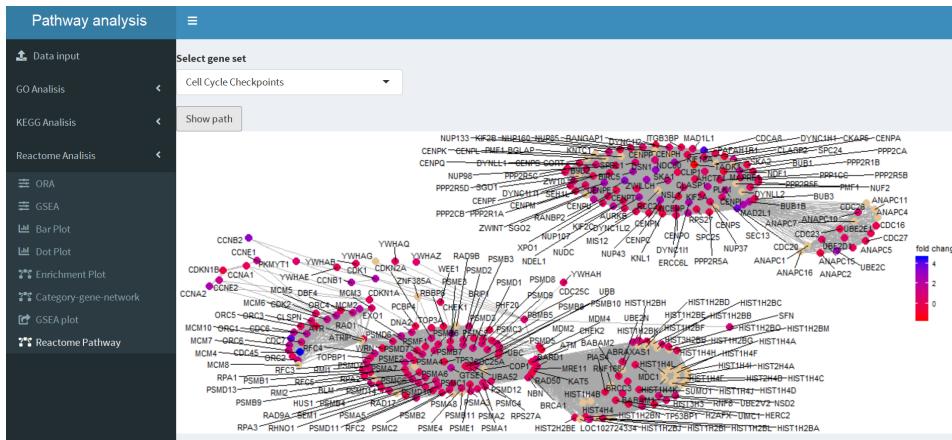
### 4.3.2 KEGG Pathway



#### imatge 4.18: KEGG pathway

## 4.4 Manual i les ajudes del programa

### 4.3.3 Reactome Pathway



imatge 4.19: Reactome pathway

## 4.4 Manual i les ajudes del programa

Per facilitar l'ús de l'aplicació he pensat com es podria fer de manera més intuïtiva possible. Primer cal destacar que com a llengua de manual he elegit l'anglès per poder fer l'ús de l'aplicació el més inclusiu possible. Segon, l'usuari pot accedir tant al manual com a l'ajuda, que es guarden en arxius .Md separats. Per accedir al manual l'usuari ha de clicar al símbol d'interrogació a prop del títol **Pathway analysis**:

## 4 L'aplicació

The screenshot shows the 'Pathway analysis' application. On the left, there's a sidebar with options: Data input, GO Analysis, KEGG Analysis, and Reactome Analysis. The main panel has a title 'Welcome to PathwayApp' and a sub-section 'Uploading your data'. It includes instructions for uploading CSV files and a small table example:

	A	B
1	EntrezID	FoldChange
2	4312	4.57261268
3	8318	4.51459372

To the right of the main panel is a large, dark gray area.

Imatge 4.20: Manual per a aplicació

Com es veu hi ha apartats diferents. Dependent dels objectius de l'usuari, aquest pot seleccionar l'apartat que més l'interessi. Així, si l'usuari vol fer l'anàlisi ORA amb l'anotació KEGG pot navegar en la secció —textbf{Scenario 3: ORA Analysis. KEGG Database}.

The screenshot shows the 'Pathway analysis' application. On the left, there's a sidebar with options: Data input, GO Analysis, KEGG Analysis, and Reactome Analysis. The main panel has a title 'Scenario 3: ORA Analysis. KEGG Database.' and a detailed description of the process:

**Assume you want to conduct overexpression analysis and annotate your genes using KEGG Database. Important: you need an internet connection to annotate your date via KEGG. Otherwise you get an error:**

'Species' should be one of organisms listed in ["http://www.genome.jp/kegg/catalog/org\\_list.html"](http://www.genome.jp/kegg/catalog/org_list.html)...

If you have Internet connection, follow following steps:

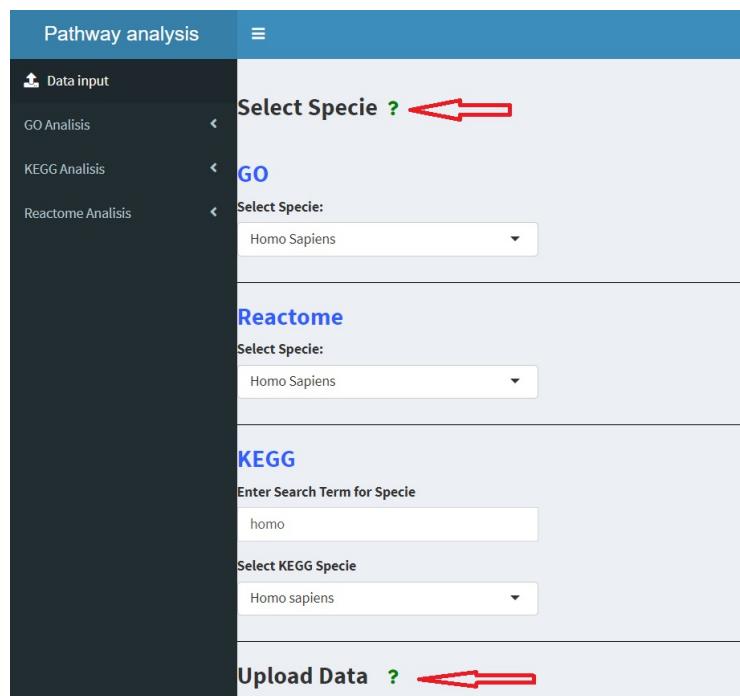
1. You need to select **Data input** on the left.
  - Under **Select Species** → KEGG select the genome to that you want annotate your genes. To find genome search in the field **Enter Search Term for Specie** a string from scientific name of the species. For instance, a search for **homo** will return **Homo sapiens** in the field **Select KEGG Specie**. Or the search for **esche** will return a long list with different **escherichia coli** annotation genomes.
  - At the bottom of the page under **Upload Data** upload the coma delimited .csv file of all the genes from your experiment. Please follow instructions of what the file should contain.
  - Upload the coma delimited .csv file of selected genes. Follow instruction of what the file should contain.
  - Check gene numbers in the output that appears when data are uploaded. Are the first 10 observations displayed correctly? Does the total number of genes correspond to data from your experiment?
2. From the menu on the left select **KEGG Analysis** and subitem **ORA**.
  - Select adjustment method.
  - Select P value threshold.
  - Click on the button **Calculate Result**.
  - Calculation may take some time. As an output you get a table with statistics. There appears a button to download results. Near the button click on the question mark to get help on the statistics in the table.
3. Visualize the result.
  - Bar plot.** Click on the subitem **Bar Plot** on the left. You can choose the number of top categories displayed. You can specify download parameters for the image. To get optimal result you may try different parameters.
  - Dot plot.** Click on the subitem **Dot Plot** on the left.

Imatge 4.21: Manual per a l'anàlisi ORA amb l'anotació KEGG

#### 4.4 Manual i les ajudes del programa

També, l'usuari pot accedir a l'ajuda clicant als símbols d'interrogació distribuïts per l'aplicació en els llocs que penso que poden generar dubtes.

Per fer-ho possible s'utilitza el paquet `shinyhelper` que s'instal·la en executar la funció `runPathwayApp()`.

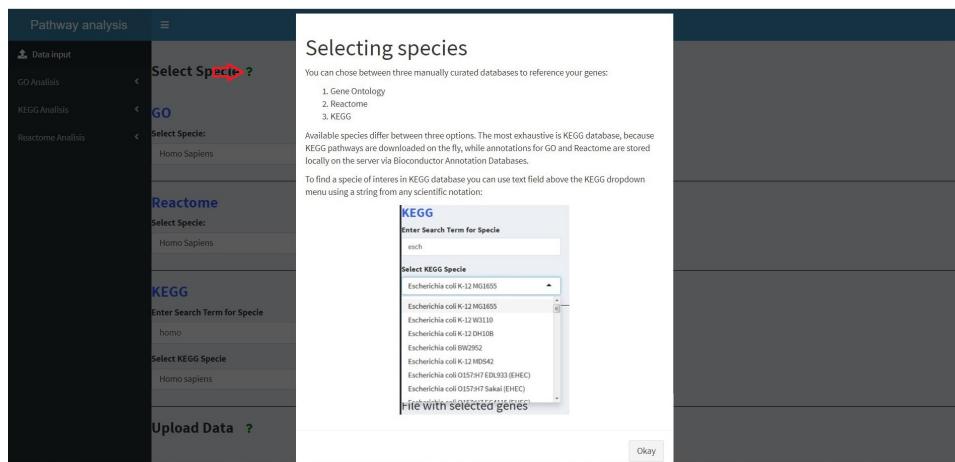


imatge 4.22: Senyals d'ajuda

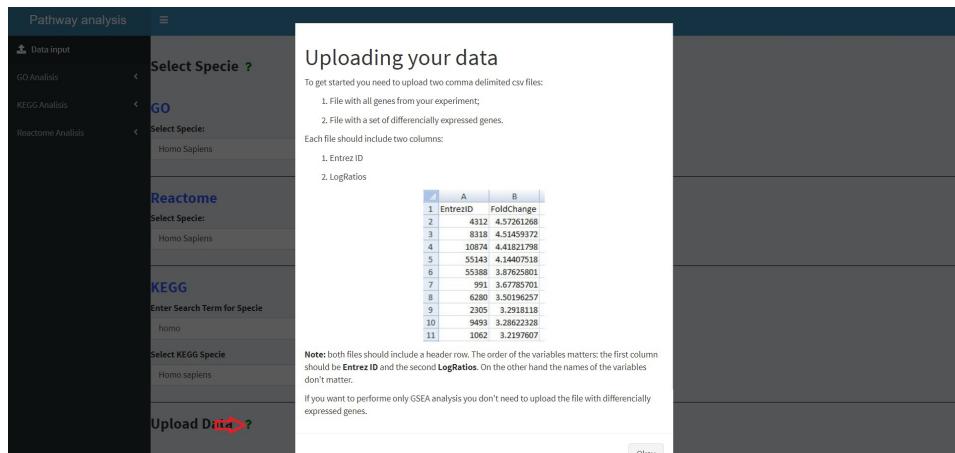
El clic en aquests senyals fa que aparegui una finestreta amb la informació d'ajuda.

Aquí hi ha informació de l'apartat **Data Input**:

## 4 L'aplicació



Imatge 4.23: Ajuda per a l'elecció de l'espècie



Imatge 4.24: Ajuda per pujar les dades

Les informacions per a l'apartat ORA són les següents:

## 4.4 Manual i les ajudes del programa

**Understanding ORA output**

Statistical test is based on the hypogeometrical distribution:

$$p = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\binom{M}{k} \binom{N-M}{n-k}}{\binom{N}{n}}$$

In this equation,  $N$  is the total number of genes in the background distribution,  $M$  is the number of genes within that distribution that are annotated to the node of interest,  $n$  is the size of the list of genes of interest and  $k$  is the number of genes within that list which are annotated to the node.

El valor de  $p$  obtingut amb aquesta fórmula dona la probabilitat de veure el nombre  $x$  de gens de la llista relacionats amb la ruta específica en la llista del nombre total de gens  $n$  donat la proporció de gens relacionats amb aquesta ruta en la distribució de fons.

- Description:** Name of the pathway: either GO, KEGG or Reactome;
- GeneRatio:** Fraction:  $\frac{\text{Number of differentially expressed genes in a pathway}}{\text{Total number of differentially expressed genes}} = \frac{M}{N}$ ;
- BgRatio:** Fraction:  $\frac{\text{Number of genes annotated to the node of interest}}{\text{Total number of genes in the background distribution}} = \frac{k}{n}$ ;
- pvalue:** P-Value obtained with formula for hypogeometrical distribution.
- p.adjust:** P-Value adjusted via method specified by user.

Imatge 4.25: Infromació per la interpretació d'anàlisi ORA

Aquí cal destacar que les fòrmules, depenen de l'ordinador, no apareixen degudament en el RStudio Browser. Sí que apareixen bé quan l'aplicació s'obre via l'internet browser. L'usuari ha de tenir connexió amb internet perquè l'aplicació pugui descodificar la fòrmula via MathJax. Encara no he trobat la causa per la qual el Rstudio Browser en alguns ordinadors no visualitza bé les fòrmules. Pot ser un problema amb Java, que s'ha d'actualitzar? Ho estic investigant.

**From R manual `p.adjust{stats}`**

The adjustment methods include the Bonferroni correction in which the  $p$ -values are multiplied by the number of comparisons. Less conservative corrections are also included by Holm (1979), Hochberg (1988) (`hochberg`), Hommel (1988) (`hommel`), Benjamini and Hochberg (1995) (`BH` or its alias `fdr`), and Benjamini, Yekutieli, and others (2001) (`BY`), respectively. A pass-through option (`none`) is also included.

The first four methods are designed to give strong control of the family-wise error rate. There seems no reason to use the unmodified Bonferroni correction because it is dominated by Holm's method, which is also valid under arbitrary assumptions. Hochberg's and Hommel's methods are valid when the hypothesis tests are independent or when they are non-negatively associated (Sarkar 1998; Sarkar and Chang 1997). Hommel's method is more powerful than Hochberg's, but Hochberg's is usually faster and has Hochberg's `p.adjust` is better for discovery rates. The BH (aka `fdr`) and BY methods of Benjamini, Hochberg, and Yekutieli control the false discovery rate, the expected proportion of false discoveries amongst the rejected hypotheses. The false discovery rate is a less stringent condition than the family-wise error rate, so these methods are more powerful than the others.

**References**

Benjamini, Yoav, and Yosef Hochberg. 1995. "Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing." *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)* 57 (1). Wiley Online Library: 289–300.

Benjamini, Yoav, Daniel Yekutieli, and others. 2001. "The Control of the False Discovery Rate in Multiple Testing Under Dependency." *The Annals of Statistics* 29 (4). Institute of Mathematical Statistics: 1165–86.

Hochberg, Yosef. 1988. "A Sharper Bonferroni Procedure for Multiple Tests of Significance." *Biometrika* 75 (4). Oxford University Press: 800–802.

Holm, Sture. 1979. "A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure." *Scandinavian Journal of Statistics* 6 (2): 65–70.

Imatge 4.26: L'ajuda per a la selecció del mètode d'ajustament

## 4 L'aplicació

The screenshot shows the GSEA software interface. On the left, there's a sidebar with various analysis options: Data input, GO Analysis, GSEA, and KEGG Analysis. The main area displays a table of results with columns ID and Description. Three rows are visible: GO:0031012 (extracellular matrix), GO:0099568 (cytoplasmic region), and GO:0062023 (collagen-containing). A red arrow points to a 'Download Result' button. To the right, a large panel titled 'Understanding GSEA' contains text explaining the methodology and includes a diagram illustrating the enrichment process.

Imatge 4.27: Ajuda per la interpretació de GSEA

## 5 Validació dels resultats

L'anàlisi de les rutes representa l'últim pas de l'anàlisi d'expressions. Per dur a terme l'anàlisi de rutes és necessari tenir unes dades que ja estiguin processades prèviament (normalització, càcul de les LogRatios, ajustament dels gens repetits a l'array, selecció dels gens diferencialment expressats, etc.). Les dades de [GEO \(Gene Expression Omnibus\)](#) estan però disponibles com a màxim en format normalitzat. Caldria doncs fer una anàlisi per arribar a un llistat de gens diferencialment expressats amb les logRatios per tots els gens de la mostra. Fer això no seria cap problema i de fet ho he fet per altres estudis. El problema és que arribo a resultats diferents dels resultats dels estudis d'on provenen les dades (i no parlo de l'anàlisi de les rutes sinó ja del càcul de les logRatios). Per tant les dades que entraria a l'aplicació serien diferents de les dades de l'estudi i lògicament amb aquesta comprovació no comprovo el que realment m'interessa. Podria, doncs, dedicar-me a trobar el motiu pel qual els resultats són diferents, però fer totes aquestes comprovacions prèvies no té a veure amb l'objecte del meu treball de màster, l'anàlisi de les rutes. Per tant he procedit a contactar el meu professor per si tindria (o coneixeria) dades preprocessades fins a un llistat de gens amb logRatios i amb el set de gens diferencialment expressats, per tal que les pugui utilitzar en la meva aplicació. El meu professor m'ha redirigit, entre altres enllaços molt útils, al seu repositori en [github.com](#).

Estudi	GEO ID	Espècie	Tipo d'experiment	Font
[Schmidt et al., 2008]	<a href="#">GSE11121</a>	Homo sapiens	Microarrays	<a href="#">Paquet DOSE de Bioconductor</a>
[Li et al., 2017]	<a href="#">GSE100924</a>	Mus musculus	Microarrays	<a href="#">Github Sanchez Pla</a>
[Farmer et al., 2005]	<a href="#">GSE1561</a>	Homo sapiens	Microarrays	<a href="#">Github Sanchez Pla</a>
[Hengel et al., 2003]	<a href="#">DAVID Demo List 1</a>	Homo sapiens	Microarrays	<a href="#">DAVID</a>

Les dades de [\[Schmidt et al., 2008\]](#), que s'utilitzen en els vignettes de `clusterProfiler` i `ReactomePA`, ja les he mostrat en gran part a dalt quan explicava el contingut de l'aplicació. Els resultats obtinguts amb l'aplicació són iguals

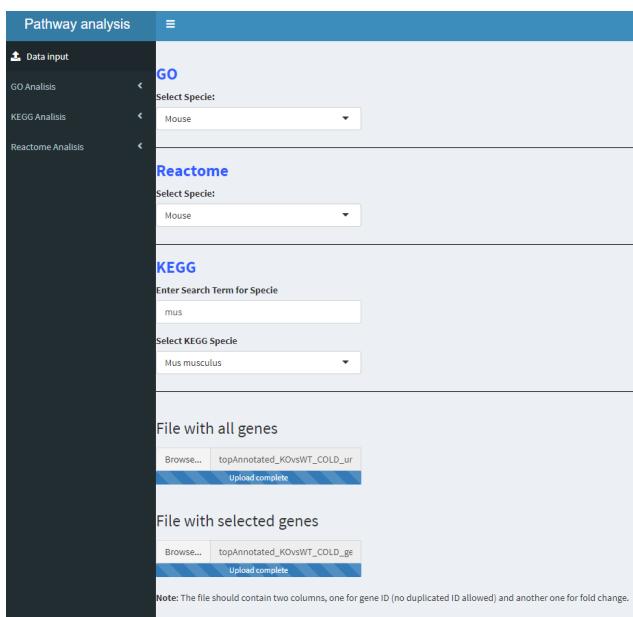
## 5 Validació dels resultats

als resultats en els vignettes mencionats. Procediré doncs amb l'exemple basat en les dades de [Li et al., 2017] .

### 5.1 Exemple d'anàlisi 1. GEO: GSE100924

Les dades d'estudi [Li et al., 2017] són ja preprocessades per Ricardo Gonzalo Sanz i Sanchez Pla i estan disponibles a [github](#). De la carpeta *results* he agafat la taula *topAnnotated\_KOvsWT\_COLD.csv*. Sanz i Pla utilitzen el paquet ReactomePA per a l'anàlisi d'enriquiment. Repeteixo doncs el seu anàlisi utilitzant l'aplicació.

1. Ellegeixo l'espècie *Mus musculus* per a GO, KEGG i Reactome.



imatge 5.1: Selecció d'espècie

L'output a baix indica que s'ha pujat el total de 5995 gens. Per a l'arxiu dels gens seleccionats l'aplicació diu que s'han pujat 769 gens.

## 5.1 Exemple d'anàlisi 1. GEO: GSE100924

Note: The file should contain two columns, one for gene ID (no duplicated ID allowed) and another one for fold change.

You uploaded: 5995 genes  
First 10 entries

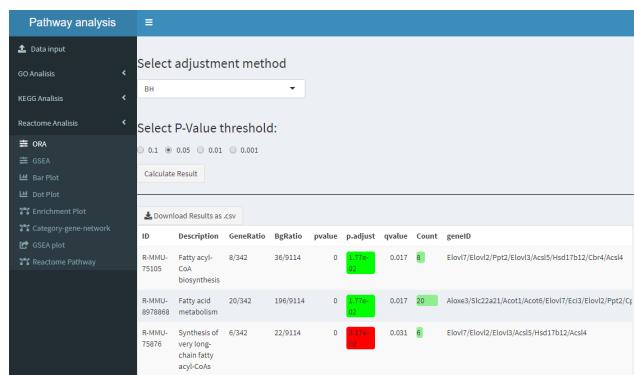
Entrez ID	FoldChange
108864	-0.420
319263	0.049
59014	-0.143
109294	0.114
320492	-1.454
98711	0.072
17087	-0.653
75712	-0.384
14859	0.378
27993	-0.113

You selected: 769 genes  
First 10 entries

Entrez ID	FoldChange
320492	-1.454
50785	0.743

Imatge 5.2: Selecció d'espècie

- Clico en l'apartat *Reactome Analysis* → ORA. Selecciono com a mètode d'ajustament BH i el cut-off del valor de P ajustat 0.05. Clico a Calculate results



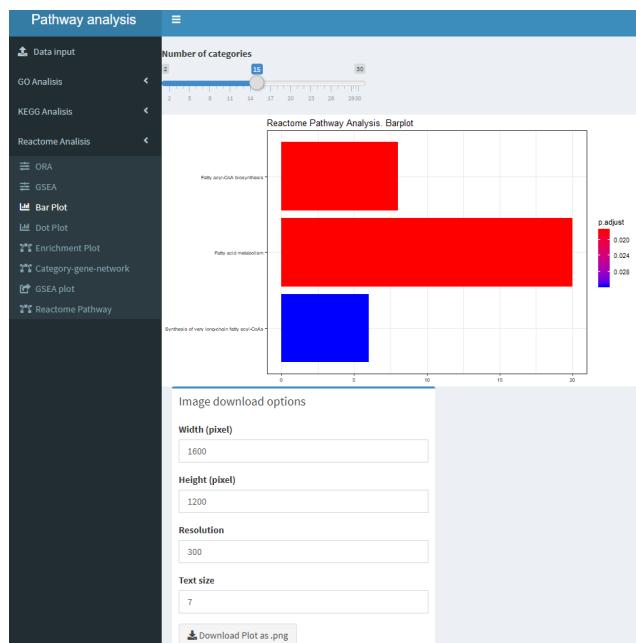
Imatge 5.3: Resultat d'anàlisi ORA de Reactome

Observem que els gens mostrats són els mateixos esmentats per Sanz i Pla.

- Visualització del resultat ORA

- Seleccio de *Reactome Analysis* → *Bar Plot*

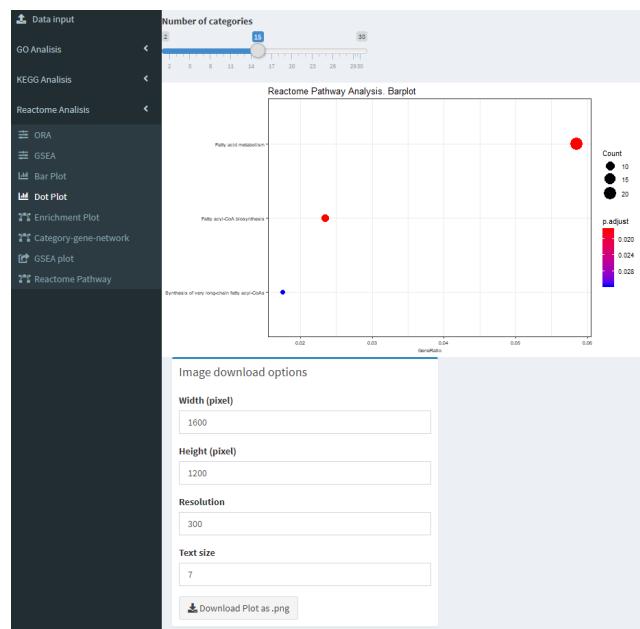
## 5 Validació dels resultats



Imatge 5.4: Gràfic de barres

- Selecciono *Reactome Analysis* → *Dot Plot*

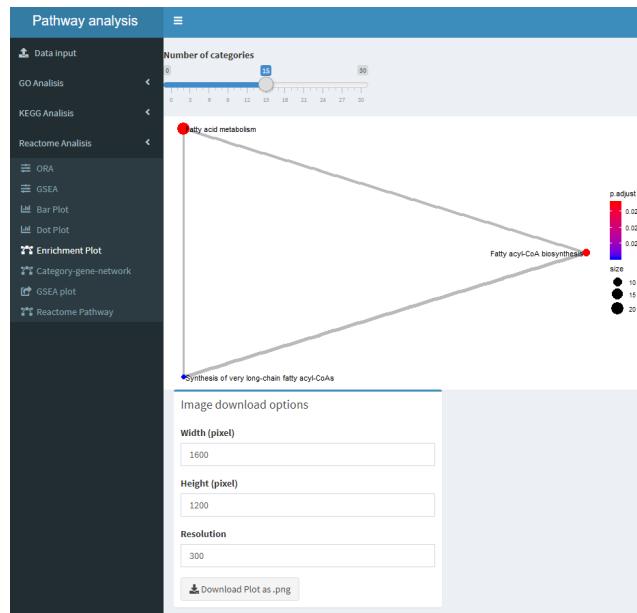
## 5.1 Exemple d'anàlisi 1. GEO: GSE100924



Imatge 5.5: Gràfic de punts

- Seleccions *Reactome Analysis* → *Enrichment Map Plot*

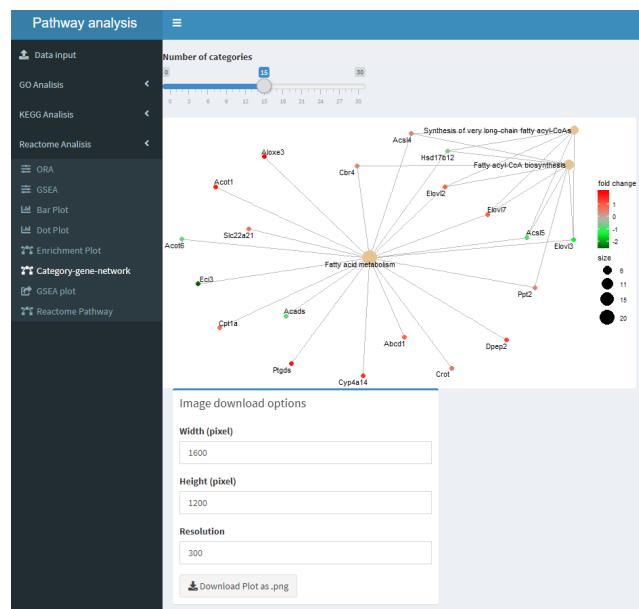
## 5 Validació dels resultats



Imatge 5.6: Mapa d'enriquement

- Selecciono *Reactome Analysis* → *Category Gene Network*

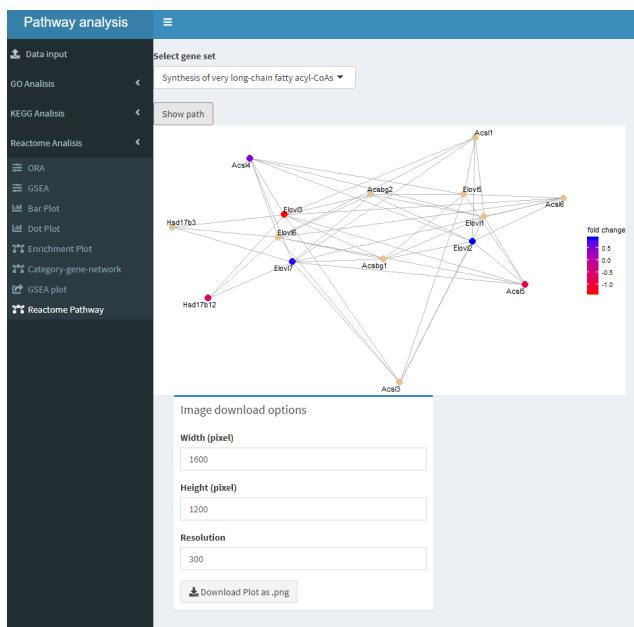
## 5.1 Exemple d'anàlisi 1. GEO: GSE100924



Imatge 5.7: Red de les categories i gens

- Seleccions *Reactome Analysis* → *Reactome Pathway*

## 5 Validació dels resultats

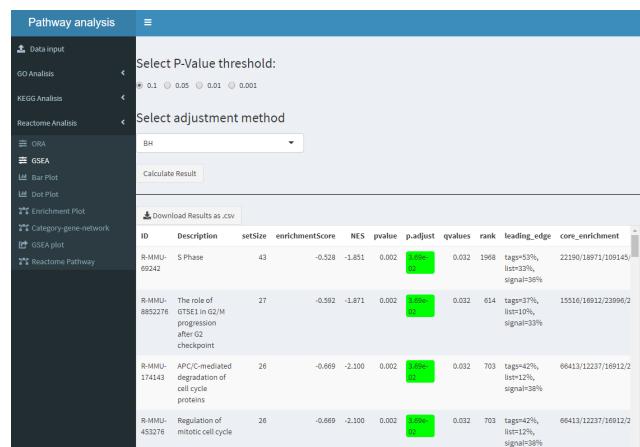


## imatge 5.8: Rutes Reactome

Additionalment a l'anàlisi ORA podem fer, mitjançant l'aplicació, l'anàlisi GSEA per les rutes de Reactome. Per fer-ho:

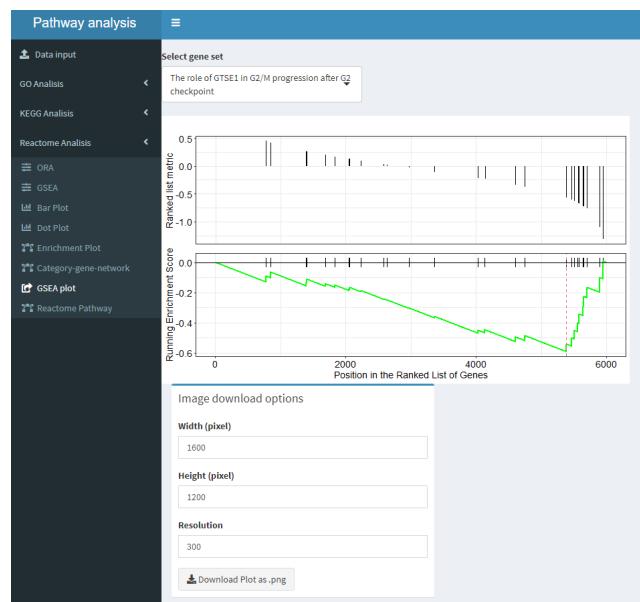
1. Clico en l'apartat *Reactome Analysis* → *GSEA*. Seleccioño com a mètode d'ajustament *BH* i el cut-off del valor de P ajustat 0.05. Clico a *Calculate results*  
Amb el valor de P de 0.05 l'anàlisi no troba cap ruta enriquida.
  2. Augmento el Cut-Off del valor de P a 0.1  
Amb el Cut-Off més alt l'aplicació retorna un llistat de gens.

## 5.1 Exemple d'anàlisi 1. GEO: GSE100924



imatge 5.9: Anàlisi GSEA

3. Per obtenir els gràfics GSEA anem a *Reactome Analysis*→*GSEA plot*

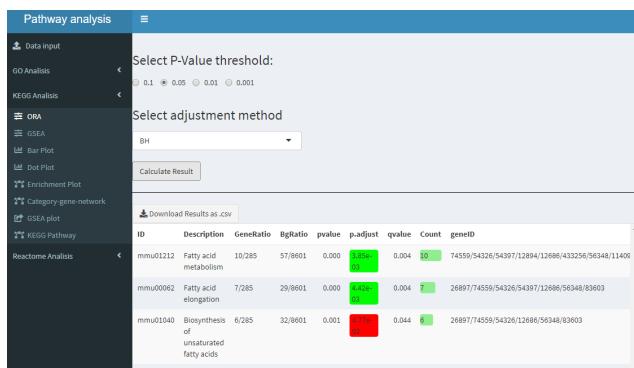


imatge 5.10: Gràfic GSEA

També podem fer l'anàlisi de KEGG. El resultat de KEGG és similar a l'anàlisi de Reactome. L'aplicació permet però generar les rutes KEGG. Per obtenir-les:

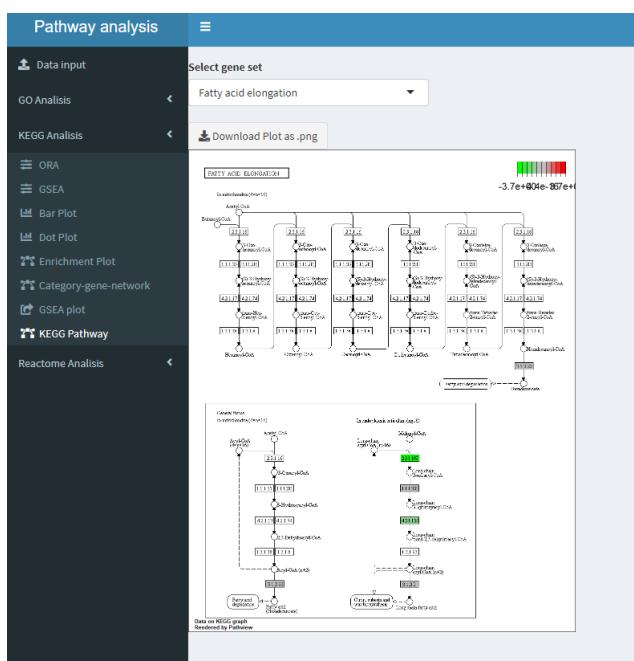
## 5 Validació dels resultats

1. Clico en l'apartat *KEGG Analysis*→*ORA*. Selecciono com a mètode d'ajustament *BH* i el cut-off del valor de P ajustat 0.05. Clico a *Calculate results*



Imatge 5.11: Anàlisi ORA de KEGG

2. Anem a *KEGG*→*KEGG Pathway*

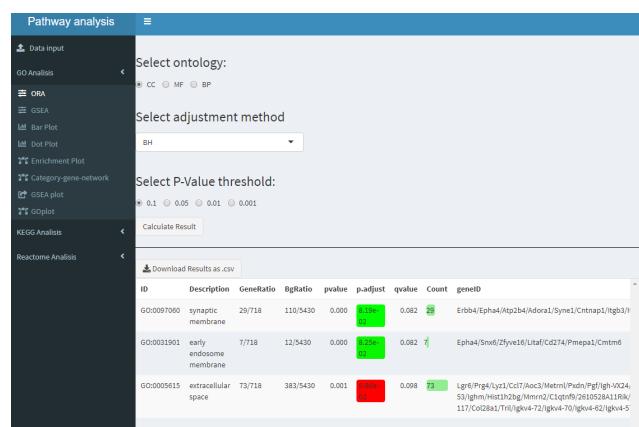


Imatge 5.12: Gràfic de les rutes KEGG

## 5.1 Exemple d'anàlisi 1. GEO: GSE100924

L'anàlisi GO no retorna cap terme GO amb el nivell de significació de 0.05. Pujant el nivell de significació fins 0.1 retorna un llistat dels termes enriquits per als components cel·lulars.

Clico en l'apartat *GO Analysis→ORA*. Selecciono com a mètode d'ajustament *BH* i el cut-off del valor de P ajustat 0.1. Selecciono també CC. Clico a *Calculate results*



Imatge 5.13: L'anàlisi ORA de GO



## 6 Discussió



# Appendix



# Bibliography

- [Boyle et al., 2004] Boyle, E. I., Weng, S., Gollub, J., Jin, H., Botstein, D., Cherry, J. M., and Sherlock, G. (2004). Go:: Termfinder—open source software for accessing gene ontology information and finding significantly enriched gene ontology terms associated with a list of genes. *Bioinformatics*, 20(18):3710–3715.
- [Chang et al., 2018] Chang, W., Cheng, J., Allaire, J., Xie, Y., and McPherson, J. (2018). *shiny: Web Application Framework for R*. R package version 1.2.0.
- [Clark et al., 2015] Clark, N. R., Szymkiewicz, M., Wang, Z., Monteiro, C. D., Jones, M. R., and Ma'ayan, A. (2015). Principle angle enrichment analysis (paea): Dimensionally reduced multivariate gene set enrichment analysis tool. In *2015 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM)*, pages 256–262. IEEE.
- [Class et al., 2017] Class, C. A., Ha, M. J., Baladandayuthapani, V., and Do, K.-A. (2017). idingo—integrative differential network analysis in genomics with shiny application. *Bioinformatics*, 34(7):1243–1245.
- [Consortium, 2004] Consortium, G. O. (2004). The gene ontology (go) database and informatics resource. *Nucleic acids research*, 32(suppl\_1):D258–D261.
- [Draghici et al., 2007] Draghici, S., Khatri, P., Tarca, A. L., Amin, K., Done, A., Voichita, C., Georgescu, C., and Romero, R. (2007). A systems biology approach for pathway level analysis. *Genome research*, 17(10):1537–1545.
- [Farmer et al., 2005] Farmer, P., Bonnefoi, H., Becette, V., Tubiana-Hulin, M., Fumoleau, P., Larsimont, D., MacGrogan, G., Bergh, J., Cameron, D., Goldstein, D., et al. (2005). Identification of molecular apocrine breast tumours by microarray analysis. *Breast Cancer Research*, 7(2):P2–11.

## Bibliography

- [Ge and Jung, 2018] Ge, S. and Jung, D. (2018). Shinygo: a graphical enrichment tool for animals and plants. *bioRxiv*, page 315150.
- [Hengel et al., 2003] Hengel, R. L., Thaker, V., Pavlick, M. V., Metcalf, J. A., Dennis, G., Yang, J., Lempicki, R. A., Sereti, I., and Lane, H. C. (2003). Cutting edge: L-selectin (cd62l) expression distinguishes small resting memory cd4+ t cells that preferentially respond to recall antigen. *The Journal of Immunology*, 170(1):28–32.
- [Khatri et al., 2012] Khatri, P., Sirota, M., and Butte, A. J. (2012). Ten years of pathway analysis: current approaches and outstanding challenges. *PLoS computational biology*, 8(2):e1002375.
- [Li et al., 2017] Li, S., Mi, L., Yu, L., Yu, Q., Liu, T., Wang, G.-X., Zhao, X.-Y., Wu, J., and Lin, J. D. (2017). Zbtb7b engages the long noncoding rna blnc1 to drive brown and beige fat development and thermogenesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(34):E7111–E7120.
- [Rahnenführer et al., 2004] Rahnenführer, J., Domingues, F. S., Maydt, J., and Lengauer, T. (2004). Calculating the statistical significance of changes in pathway activity from gene expression data. *Statistical applications in genetics and molecular biology*, 3(1):1–29.
- [Reimand et al., 2019] Reimand, J., Isserlin, R., Voisin, V., Kucera, M., Tannus-Lopes, C., Rostamianfar, A., Wadi, L., Meyer, M., Wong, J., Xu, C., et al. (2019). Pathway enrichment analysis and visualization of omics data using g: Profiler, gsea, cytoscape and enrichmentmap. *Nature protocols*, page 1.
- [Schmidt et al., 2008] Schmidt, M., Böhm, D., Von Törne, C., Steiner, E., Puhl, A., Pilch, H., Lehr, H.-A., Hengstler, J. G., Kölbl, H., and Gehrmann, M. (2008). The humoral immune system has a key prognostic impact in node-negative breast cancer. *Cancer research*, 68(13):5405–5413.
- [Subramanian et al., 2005] Subramanian, A., Tamayo, P., Mootha, V. K., Mukherjee, S., Ebert, B. L., Gillette, M. A., Paulovich, A., Pomeroy, S. L., Golub, T. R., Lander, E. S., et al. (2005). Gene set enrichment analysis: a knowledge-based approach for interpreting genome-wide expression profiles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(43):15545–15550.

## Bibliography

[Tarcă et al., 2008] Tarca, A. L., Draghici, S., Khatri, P., Hassan, S. S., Mittal, P., Kim, J.-s., Kim, C. J., Kusanovic, J. P., and Romero, R. (2008). A novel signaling pathway impact analysis. *Bioinformatics*, 25(1):75–82.

[Wickham, 2015] Wickham, H. (2015). R packages.