IGOR RODRIGUES DA COSTA

ALFie: um programa para a busca exaustiva de locos anônimos E SUA VALIDAÇÃO EM GENOMAS DE *hOMINÍDEOS*

Rio de Janeiro

2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE BIOQUÍMICA MÉDICA LEOPOLDO DE MEIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA BIOLÓGICA

IGOR RODRIGUES DA COSTA

ALFIE: UM PROGRAMA PARA A BUSCA EXAUSTIVA DE LOCOS ANÔNIMOS E SUA VALIDAÇÃO EM GENOMAS DE HOMINÍDEOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química Biológica, Instituto de Bioquímica Médica Leopoldo de Meis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Orientador:Prof. Francisco Prosdocimi,Ph.D

Coorientador: Prof. William Bryan Jennings, Ph.D

Rio de Janeiro

2015

|  |
| --- |
| Costa, Igor Rodrigues da  C6783 Alfie: um programa para a busca exaustiva de locos anônimos e sua validação em genomas de *hominídeos* / Igor Rodrigues da Costa. – Rio de Janeiro, 2015.  62 f.  Orientador: Francisco Prosdocimi  Coorientador: William Bryan Jennings  Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Bioquímica Médica Leopoldo de Meis, Programa de Pós-graduação em Química Biológica, 2015.  1. Locos Anônimos. 2. Bioinformática. 3. Genômica Comparativa. I. Prosdocimi, Francisco, orientador. II. Jennings, William Bryan, coorientador. III. Título. |

IGOR RODRIGUES DA COSTA

ALFIE: UM PROGRAMA PARA A BUSCA EXAUSTIVA DE LOCOS ANÔNIMOS E SUA VALIDAÇÃO EM GENOMAS DE hOMINÍDEOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química Biológica, Instituto de Bioquímica Médica Leopoldo de Meis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Aprovada em / /

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Prof. Francisco Prosdocimi, Ph.D, UFRJ, Orientador

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Prof. William Bryan Jennings, Ph.D, UFRJ, Coorientador

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Prof. Carlos Eduardo Guerra Schrago, Ph.D, UFRJ

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Prof.a Cristina Yumi Miyaki, Ph.D, USP

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Prof. Fernando Araujo Monteiro, Ph.D, FIOCRUZ

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Prof. Franklin David Rumjanek, Ph.D, UFRJ, Suplente

A você, caro leitor

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Onir e Gisele, ao meu irmão Eric e a toda a minha família, pelo amor e por me incentivarem a aprender mais desde a infância.

Agradeço à Claudia, minha namorada fofinha, por me aturar, amar e por ser a pessoa com quem eu compartilho as coisas pequenas e grandes.

Agradeço especialmente ao meu orientador e amigo, Prof. Francisco por ter aberto minha mente a novas ideias e me guiado no mundo da bioinformática.

Agradeço aos colaboradores deste trabalho ao Prof. Franklin por ter aceitado revisar este trabalho e ao Prof. Bryan, coorientador deste trabalho, com sua empolgação contagiante e sua essencial contribuição realizando as análises de genética populacional.

Agradeço aos amigos do Lâmpada e do Laboratório de Biologia Molecular do Câncer, Nívea, Mariana, Juan, Bruna, Ana Carolina, Violeta, Nicholas, Marcela e todos os outros, pela amizade, apoio e festas (!) e por serem uma excelente compania.

Agradeço aos colegas do LADETEC, pela amizade, apoio e compreensão durante a elaboração deste trabalho.

Agradeço aos professores da banca, Prof. Carlos, Prof.a Cristina e Prof. Fernando por aceitarem avaliar este trabalho e pelas críticas.

Esta dissertação, que é apenas mais um passo da minha inevitável conquista mundial, é dedicada ao meu amigo Alex, numa homenagem póstuma para aquele que seria hoje meu companheiro de pesquisa em bioinformática e de piadas e jogos nerds. *May the force be with you*.

Resumo

COSTA, Igor Rodrigues da. **Alfie: um programa para a busca exaustiva de locos anônimos e sua validação em genomas de hominídeos**. 2015. Tese (Mestrado em Química Biológica) – Instituto de Bioquímica Médica Leopoldo de Meis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

As novas tecnologias de sequenciamento provocaram um aumento exponencial na quantidade de genomas completos e parciais disponíveis. Estes genomas podem ser utilizados para a predição de marcadores genéticos ideais para genética de populações, em regiões sob seleção neutra e com segregação independente, chamados de locos anônimos. Este trabalho descreve a criação de um método computacional de alta eficiência para a predição de locos anônimos em genomas completos ou parciais. O programa, chamado *alfie,* foi criado usando a linguagem de programação python em conjunto com a biblioteca biophyton e contém 2 500 linhas de código. Para encontrar os locos anônimos, o *alfie* seleciona regiões com distância maior que 200 kb de genes ou de outros locos e procura estas regiões em outros genomas, filtrando apenas os locos com cópia única. O *alfie* foi aplicado em quatro genomas de Hominídeos: *Homo* sapiens (humano), *Gorilla gorilla* (gorila), *Pan troglodytes* (chimpanzé) e *Pongo abelii* (orangotango), gerando um conjunto de 300 locos anônimos. Estes locos anônimos foram submetidos à análise filogenética, predição de modelos de substituição e estimativa de população ancestral efetiva e tempo de divergência. Os parâmetros de tamanho efetivo de população ancestral foram estimados entre 37 000 e 50 000, 40 000 e 43 000, 72 000 e 95 000 para as linhagens humano-chimpanzé, gorila e orangotango, respectivamente. Já os parâmetros de tempo de divergência foram estimados em 4,3; 6,1 e 12,3 Ma, respectivamente para os mesmos clados. Esses parâmetros foram obtidos com um intervalo de confiança de 95% consideravelmente menor do que os dados publicados previamente, devido a quantidade imprecedente de locos não ligados obtidos neste trabalho.

Palavras-chave: Bioinformática, genômica, locos anônimos, genética populacional

Abstract

COSTA, Igor Rodrigues da. **Alfie: um programa para a busca exaustiva de locos anônimos e sua validação em genomas de hominídeos**. 2015. Tese (Mestrado em Química Biológica) – Instituto de Bioquímica Médica Leopoldo de Meis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

New sequencing technologies have caused an exponential increase in complete and partial genome availability. These genomes can be useful for ideal genetic marker prediction, to be used in population genetics. Such markers, called anonymous loci, should be under neutral selection, single copy and be independently segregated. This work describes the development of a new high efficiency computational method for anonymous loci prediction in complete or partial genomes. The program, named *alfie* (anonymous loci finder), was created using python programming language along with biopython library and contains 2 500 lines of code. In order to find anonymous loci, *alfie* selects regions further than 200 kb from genes and other loci and search for homologous regions in other genomes, filtering only single copy loci. *Alfie* was validated using four Hominidae genomes: *Homo* sapiens (human), *Gorilla gorilla* (gorilla), *Pan troglodytes* (chimpanzee) e *Pongo abelii* (orangutan), generating a 300 anonymous loci dataset. These loci were submitted to phylogenetic analysis, substitution model prediction and population genetic parameter estimation. The ancestral effective populations sizes were estimated to be between 37 000 and 50 000, 40 000 and 43 000, 72 000 and 95 000 for the human-chimp, gorilla and orangutan lineages, respectively. Likewise, the divergence time parameters were estimated to be 4,3; 6,1 and 12,3 MYA, respectively for the same clades. These parameters had a considerably shorter 95% confidence interval than previously published data, a direct consequence of the unprecedented large number of unlinked loci studied.

Keywords: Bioinformatics, genomics, anonymous loci, population genetics

Lista de Figuras

[Figura 1: Algoritmo do *alfie* 20](#_Toc429622285)

[Figura 2: Distribuição dos ALs putativos e regiões anônimas 24](#_Toc429622286)

[Figura 3: Distribuição dos ALs encontrados 24](#_Toc429622287)

[Figura 4: Modelos de substituição preditos 25](#_Toc429622288)

[Figura 5: Estimativa do tempo de divergência dos Hominidae 27](#_Toc429622289)

[Figura 6: Estimativa do tamanho efetivo de população 27](#_Toc429622290)

[Figura 7: Histograma dos valores de Ti/Tv encontrados 28](#_Toc429622291)

Lista de Tabelas

[Tabela1: Sumário dos resultados encontrados 31](#_Toc429622292)

Lista de Siglas

|  |  |
| --- | --- |
| AL | Loco Anônimo *(Anonymous Loci)* |
| SNP | Polimorfismo de Nucleotídeo Único *(Single Nucleotide Polymorphism)* |
| GFF | *General Feature Format* |
| NGS | Sequenciamento de Nova Geração *(Next Generation Sequencing)* |
| bp | Pares de Base *(Base Pair)* |
| PCR | Reação de Polimerase em Cadeia *(Polymerase Chain Reaction)* |
| Ma | Milhões de anos |

Sumário

[1 Introdução 12](#_Toc429622226)

[1.1 Breve história da genômica 12](#_Toc429622227)

[1.2 Amadurecimento da genômica computacional 13](#_Toc429622228)

[1.3 Porque estudar genética de populações 13](#_Toc429622229)

[1.3.1 O modelo dos Hominidae na genética de população 14](#_Toc429622230)

[1.4 Marcadores genéticos 14](#_Toc429622231)

[1.4.1 Microssatélites 15](#_Toc429622232)

[1.4.2 SNPs 15](#_Toc429622233)

[1.5 Locos anônimos, os marcadores ideais 15](#_Toc429622234)

[1.5.1 Estado da arte na descoberta e descrição de locos anônimos 17](#_Toc429622235)

[2 Objetivo 18](#_Toc429622236)

[2.1 Objetivos específicos 18](#_Toc429622237)

[3 Desenvolvimento 19](#_Toc429622238)

[3.1 Programas, bibliotecas e linguagem 19](#_Toc429622239)

[3.2 Alfie 19](#_Toc429622240)

[3.3 Busca de regiões anônimas 19](#_Toc429622241)

[3.3.1 Locos putativos 20](#_Toc429622242)

[3.4 Busca por homólogos 21](#_Toc429622243)

[3.5 Alinhamento múltiplo 21](#_Toc429622244)

[3.6 Outros recursos do pacote *alfie* 21](#_Toc429622245)

[4 Resultados e Discussão 23](#_Toc429622246)

[4.1 Busca de locos anônimos em genomas completos de Hominidae 23](#_Toc429622247)

[4.1.1 Busca por regiões anônimas 23](#_Toc429622248)

[4.1.2 Filtragem por conservação e unicidade 23](#_Toc429622249)

[4.2 Análise dos locos anônimos de Hominidae 23](#_Toc429622250)

[4.2.1 Mapeamento dos locos anônimos por cromossomo 24](#_Toc429622251)

[4.2.2 Modelos de substituição 25](#_Toc429622252)

[4.2.3 Filogenia 26](#_Toc429622253)

[4.2.4 Estimativa da população efetiva e tempo de divergência 26](#_Toc429622254)

[4.2.5 Teste de neutralidade 28](#_Toc429622255)

[5 Conclusão 29](#_Toc429622256)

[Anexos 30](#_Toc429622257)

[ANEXO A – Decaimento exponencial do custo de sequenciamento 30](#_Toc429622258)

[Apêndices 31](#_Toc429622259)

[APÊNDICE A – Sumário dos resultados encontrados 31](#_Toc429622260)

[APÊNDICE B – Manual do pacote alfie 40](#_Toc429622261)

[APÊNDICE C – Manuscrito em preparação 45](#_Toc429622262)

[Referências 61](#_Toc429622284)

1 Introdução

## Breve história da genômica

A palavra “genômica” surgiu em uma discussão de bar para decidir o nome de uma nova revista científica em 1986 [[1](#_ENREF_1)], focada em dados gerados pela exploração e comparação de genomas. Esta nova área nasceu junto com a era do “projeto genôma humano”, e trouxe inovações para a ciência e a sociedade, criando novos campos como a medicina personalizada e a filogenômica. O campo da genômica hoje está em franca expansão, uma projeção atual indica que, se a taxa de crescimento se mantiver, são esperados que 10 000 genomas de vertebrados sejam sequenciados nos próximos 10 anos [[2](#_ENREF_2)].

Isso deve-se à nova geração de técnicas para sequenciamento de DNA, que tem feito com que este seja cada vez mais barato, eficiente e livre de erros [[3](#_ENREF_3)]. A última década viu um decaimento exponencial do preço de sequenciamento (ANEXO A) que influenciou diretamente no crescimento exponencial da quantidade de genomas completos e parciais disponíveis e publicados [[3](#_ENREF_3), [4](#_ENREF_4)]. As técnicas hoje chamadas de *Next Generation Sequencing* (NGS) incluem diversas plataformas e tecnologias, tendo como fator comum o baixo preço e a enorme quantidade de dados gerados por corrida, superando em muitas ordens de grandeza (por volta de 108) o método de sequenciamento de Sanger.

A proliferação destas novas técnicas gerou uma avalanche de projetos que buscam a descrição inicial dos genomas de espécies modelo e também, cada vez mais, de qualquer organismo de interesse. O sequenciamento completo de um genoma, ainda hoje, não é uma tarefa trivial, pois regiões altamente repetitivas são uma barreira para os algoritmos de montagem, já que as técnicas de NGS produzem sequências curtas [[5](#_ENREF_5)]. A anotação deste genoma, que envolve a indentificação de regiões codificantes e regulatórias, é um processo contínuo e iterativo, novas versões de genomas modelo, como o do *Homo Sapiens,* são lançadas regularmente. Portanto, é muito comum que genomas sejam disponibilizados em estágios iniciais de montagem e anotação, como genomas parciais.

## Amadurecimento da genômica computacional

Da necessidade de explorar essa grande coleção de dados biológicos, normalmente medidos em gigabytes, que se acumula, surgiu a genômica computacional. Esta área se concentra na criação e aplicação de ferramentas para análise, comparação e descrição de genes, genomas e sistemas.

Bancos de dados são a matéria-prima dos estudos computacionais em problemas que envolvem “*Big Data*”. Na biologia computacional, os bancos de dados são gerados para organizar o conhecimento de modo que futuros estudos sejam facilitados. Estes bancos são disponibilizados na internet em grandes plataformas, como a do NCBI para genes [[6](#_ENREF_6)], taxonomias [[7](#_ENREF_7)], proteínas [[8](#_ENREF_8)], ou o ENSEMBL [[9](#_ENREF_9)], que é um banco de dados de genomas completos para organismos modelo.

A magnitude da produção de dados torna inviável a análise manual para a maioria dos casos, por isso o uso de programas de computador em laboratórios de genômica é essencial. Predição de genes, montagem de genomas, reconstrução filogenética e alinhamento múltiplo de sequências são algumas das tarefas realizadas hoje quase que exclusivamente por programas de computador especializados. O presente trabalho conta com a utilização intensiva, e principalmente, a criação de ferramentas computacionais, para solução de problemas na área de genética de população. Essas novas ferramentas permitirão um ganho de produtividade e rendimento relativo a técnicas manipulação *in vitro*.

## Porque estudar genética de populações

Para entender a dinâmica da evolução, migração e a história de diversos indivíduos de uma mesma espécie, é preciso observá-los no nível molecular. As pistas de eventos passados podem ser observadas no DNA, que é muitas vezes a única maneira de reconstruir os passos das populações e entender as pressões seletivas atuantes.

### O modelo dos Hominidae na genética de população

Os hominídeos são um grupo modelo para estudos de genética de população devido a grande curiosidade e importância dada a história da espécie humana. O tempo de divergência entre humanos e outros hominóides tem recebido muita atenção nas últimas decadas [[10-12](#_ENREF_10)]. Por exemplo, um estudo de sequências mitocondriais [[13](#_ENREF_13)] encontrou tempos de divergência de 7,7 milhões de anos (Ma) para a linhagem do gorila, enquanto que um estudo do pseudogene de η-globina [[14](#_ENREF_14)] encontrou valores próximos a 5,8 Ma.

Do mesmo modo, a história do clado Hominidae tem sido muito estudada [[11](#_ENREF_11), [12](#_ENREF_12), [15](#_ENREF_15), [16](#_ENREF_16)]. Normalmente, esta é inferida em grande parte pelo tamanho efetivo de população ancestral, que informa a ocorrência de gargalos populacionais. De particular interesse é a questão da existência de um gargalo populacional após a divergência entre a espécie humana e os chimpanzés. Um dos estudos com mais citações que tentou responder esta questão foi o de Chen e Li [[12](#_ENREF_12)], que utilizou 53 locos anônimos nucleares para gerar uma das estimativas mais precisas destes parâmetros.

Apesar dos hominídeos serem um dos grupos mais bem estudados, ainda não existe um consenso para as datações e valores de tamanho de população ancestral, devido a uma incerteza gerada pela diferença das datas obtidas por diferentes métodos e pela baixa precisão dos valores adiquiridos utilizando poucos marcadores. Assim, este trabalho busca criar um método de predição automática de marcadores ideais, de modo a aumentar a quantidade e qualidade dos marcadores e a precisão dos estudos de genética de populações que os utilizarem.

## Marcadores genéticos

Marcadores genéticos são sequências de DNA que, por apresentarem variações, podem ser usadas para diferenciar organismos ou espécies. O primeiro marcador genético a ser desenvolvido, 30 anos atrás, se aproveitava de variações nos sítios alvo de enzimas de restrição para criar *fingerprints* genéticos e são usados até hoje na ciência forense e em testes de paternidade [[17](#_ENREF_17)]. Avanços nas técnicas de sequenciamento nos últimos 30 anos permitiram o desenvolvimento de diversos novos marcadores genéticos, como microssatélites, polimorfismos de nucleotídeo único (SNP, *single nucleotide polymorphism*) e os locos anônimos (AL, *anonymous loci*).

Os marcadores genéticos são ferramentas versáteis, sendo úteis em campos como a ciência forense, testes de paternidade, medicina personalizada e diagnóstica, genética de população, filogenia e agropecuária, entre outros.

### Microssatélites

Um dos marcadores genéticos mais usados, por já possuir uma técnica de mapeamento e análise bem estabelecida em diversos organismos, são os microssatélites. Microssatélites pode ser definidos como regiões hiper-variáveis compostas por repetições de pares de bases ou de motivos simples (como di, tri, tetra, penta e até hexa-nucleotídeos). A diferenciação de organismos e populações é feita pela variação do tamanho desta região, que é normalmente obtida por meio de amplificação por PCR ou sequenciamento direto. Locos de microssatélites são comumente conservados em espécies relacionadas, tornando possível a utilização do mesmo marcador para espécies do mesmo gênero.

### SNPs

Outra classe de marcadores genéticos, os polimorfismos de nucleotídeos únicos (SNP, *Single Nucleotide Polymorphism*) são variações de uma única basepresentes em pelo menos 1% da população. O baixo custo para predição de SNPs, decorrente das técnicas de pirosequenciamento [[18](#_ENREF_18)] facilitou o desenvolvimento de bibliotecas contendo milhões de SNPs. Essa explosão de capacidade de sequenciamento fez com que estes marcadores se tornassem muito usados em estudos de associação genômica, onde se busca correlacionar a variação genotípica com características fenotípicas. Além disso, são também usados para estudar a migração e a filogeografia de populações, incluindo a dos seres humanos.

## Locos anônimos, os marcadores ideais

As análises de genética de populações costumam assumir diversos pressupostos sobre os marcadores estudados, como herança mendeliana, dispersão homogênia no genôma e neutralidade quanto à aptidão do organismo. Locos anônimos (ALs) são marcadores que, por definição, respeitam todas estes requisitos e são, portanto, as regiões com características ideais para estudos de genética de população e filogenia. As principais características dos ALs são:

1. Apresentar cópia única no genoma;
2. Estar sob seleção neutra;
3. Segregar independentemente.

Apesar de serem marcadores excelentes e muito informativos, as técnicas mais usadas para descrição de ALs requerem curadoria manual das sequências obtidas e são muito caras e trabalhosas. Isto ocorre porque estas técnicas são baseadas na amplificação por PCR e sequenciamento de regiões aleatórias do genoma. Considerando que aproximadamente 90%-95% do genoma humano é não codificante [[19](#_ENREF_19)], é esperado que por volta de 10% dos locos retirados de regiões amplificadas aleatoriamente estejam em regiões gênicas. Uma fração ainda maior pode estar em regiões regulatórias próximas a estes genes, sujeita a seleção não-neutra. Estes marcadores requerem verificação manual cuidadosa para filtragem dos fragmentos amplificados localizados em regiões codificantes após seu sequenciamento, o que traz uma dificuldade maior para o desenvolvimento de um número expressivo de marcadores. Por ser uma técnica árdua, muitos estudos usam por volta de 10 a 50 locos [[20-22](#_ENREF_20)], levando meses ou semanas para a obtenção destes locos.

Locos anônimos apresentam diversas vantagens sobre marcadores convencionais como SNPs e microssatélites. Primeiramente, são marcadores mais informativos, pelo simples fato de serem maiores em número de bases. Os fragmentos sequenciados costumam ter em torno de 1 kb, muito maiores que os 100-500 bp dos microssatélites ou 1 bp para os SNPs. Esta vantagem também faz com que este marcador possa ser usado numa extensão maior de tempo de divergência entre espécies enquanto que técnicas baseadas em microssatélites são muito efetivas para análise populacional, mas falham em estudos que envolvem espécies diferentes por variações na região de ligação do *primer* [[23](#_ENREF_23)].

Outra vantagem é a presença de diversos tipos de variação, como substituição, deleção e inserção, no mesmo marcador, permitindo a estimativa mais precisa para parâmetros de taxa de mutação. Por outro lado, ALs são mais difíceis de obter, são menos eficientes que marcadores gênicos para espécies distantes e não tem utilização tão difundida quanto SNPs ou microssatélites.

### Estado da arte na descoberta e descrição de locos anônimos

Técnicas *in silico* para descoberta de locos anônimos em dados de NGS são um desenvolvimento recente [[24](#_ENREF_24)], porém ainda não existem técnicas que permitam garantir que estes marcadores não estejam associados a regiões sob seleção ou de cópia única. O presente trabalho apresenta uma nova solução para estes problemas, se aproveitando da disponibilidade de genomas completos em bancos de dados na internet.

# Objetivo

Desenvolver uma metodologia *in silico* para descoberta de locos anônimos em genomas completos e aplicá-la no modelo dos Hominidae.

## Objetivos específicos

* Produzir um programa para obter locos distantes de genes em arquivos completos de genoma com anotação de regiões regulatórias;
* Encontrar os ortólogos dos locos nas espécies estudadas;
* Verificar a distribuição dos locos encontrados ao longo do genoma de referência;
* Reconstruir árvores filogenéticas e estimar o modelo de substituição para cada loco encontrado em todos os genomas;
* Estimar os parâmetros de população ancestral efetiva e tempo de divergência para o grupo dos hominídeos.

# Desenvolvimento

## Programas, bibliotecas e linguagem

Este programa foi desenvolvido na linguagem Python, versão 2.7, com o auxílio da biblioteca Biopython [[25](#_ENREF_25)] e de programas auxiliares: BLAST+ [[26](#_ENREF_26)] para busca de sequências e PhyML [[27](#_ENREF_27)] para reconstrução de árvores filogenéticas. O programa foi chamado de *alfie* (*anonymous loci finder*) e disponibilizado com licença de código aberto GPL. O *alfie* pode ser obtido a partir do repositório git hospedado no *github*: https://github.com/igorrcosta/alfie. Neste site também está um manual completo de uso do programa (APÊNDICE 2).

## Alfie

O *alfie* é um programa que efetua os diversos passos e filtros para busca e obtenção exaustiva de locos anônimos em genomas completos. A interface atual do programa é por linha de comando, usando *flags* para configurar as opções de análise. O *alfie* recebe, como arquivos de entrada, dois ou mais genomas em formato FASTA, sendo um deles o genoma de referência, e um arquivo GFF de anotação do genoma de referência, retornando os ALs encontrados em todos os genomas.

## Busca de regiões anônimas

O primeiro passo do programa é, a partir de um genoma referência e um arquivo contendo a anotação das regiões funcionais (GFF), selecionar todas as regiões que estão a uma distancia superior a 200 kb de qualquer gene (em uma análise mais conservadora, podem ser excluídas também as regiões próximas a pseudogenes). Regiões próximas (10 kb) dos telômeros, que são as regiões terminais dos cromossomos, também são excluídas. (Fig. 1 A)

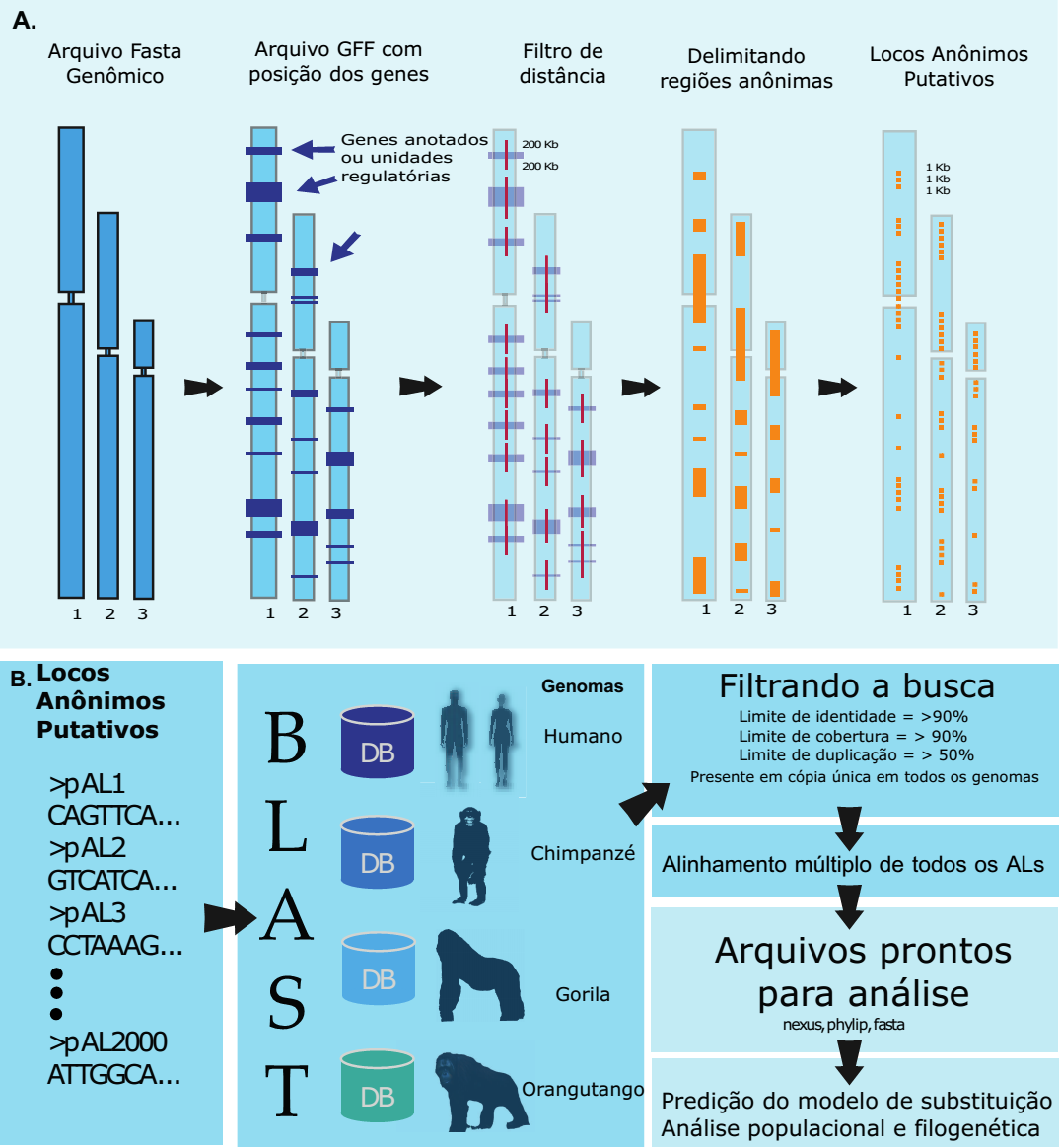


Figura 1: Algoritmo do *alfie*

### Locos putativos

As regiões anônimas do genoma de referência são recortadas em fragmentos de 1 kb, de modo diminuir a chance de que eventos de recombinação tenham ocorrido dentro do próprio loco. Estes fragmentos são recortados apenas de regiões anônimas sem bases não identificadas (“N”s). Ao fim, esses fragmentos, chamados de locos anônimos putativos, são salvos em um arquivo FASTA (Fig. 1 A).

## Busca por homólogos

Para gerar um banco de dados útil para análise filogenética o programa busca locos homólogos aos locos putativos do genoma de referência (Fig. 1 B). Os locos anônimos putativos são usados como *query* para busca em todos os genomas estudados. Usando os parâmetros padrões ao executar o programa, uma cópia homóloga é definida por no mínimo 90% de cobertura e 90% de identidade com a sequência de referência. Do mesmo modo, é considerada repetição qualquer sequência que possua mais de uma cópia com mais de 50% de identidade e 90% de cobertura.

Apenas os locos encontrados sem repetições em todos os genomas são selecionados para o próximo passo da análise.

## Alinhamento múltiplo

As sequências homólogas encontradas na busca por BLAST são extraídas dos genomas e salvas em arquivos FASTA. Cada arquivo é alinhado separadamente pelo programa ClustalW [[28](#_ENREF_28)]. São selecionados apenas as sequências que possuam acima de um certo número de bases alinhadas (por padrão, 500 bp). Destes locos são escolhidos o número máximo de locos de modo que todos estejam a uma distância superior a 200 kb do loco mais próximo, garantindo a segregação independente destes locos, que agora já podem ser considerados verdadeiros locos anônimos.

Os alinhamentos são salvos em diversos formatos, como FASTA, NEXUS e PHILIP, facilitando análises posteriores.

## Outros recursos do pacote *alfie*

Os passos realizados pelo programa *alfie* também podem ser realizados independentemente e com a adição de novos parâmetros e etapas. Um preditor de *primer* baseado no programa *primer3* está incluído, tornando possível, por exemplo,construir *primers* de locos putativos, retirados de um genoma referência, para amplificar e sequenciar em espécies próximas que não possuam o genoma completo ou parcial disponíveis

Outras etapas que podem ser realizadas ao final da análise são a reconstrução filogenética e predição dos modelos de substituição, realizados por *scripts* que executam os programas *PhyML* [[27](#_ENREF_27)] e *modeltest* [[29](#_ENREF_29)], respectivamente.

O *alfie* também pode ser configurado para encontrar regiões próximas a genes para comparação, utilizando distâncias negativas no parâmetro da distância gênica. Por exemplo, definindo o parâmetro de distância gênica em −2 000 bp, os locus serão extraídos a uma distância máxima de 2 kb dos genes.

# Resultados e Discussão

Após o desenvolvimento do *alfie*, este foi aplicado para a busca de locos anônimos nos genomas de Humano, Chimpanzé, Gorila e Orangotango. Os ALs encontrados foram analisados para obtenção de uma nova estimativa dos parâmetros populacionais destas espécies.

## Busca de locos anônimos em genomas completos de Hominidae

Os genomas utilizados foram os seguintes: *Homo sapiens* versão 38, *Pan troglodytes* versão 2.1.4, *Gorilla gorilla* versão 3.1 e *Pongo abelii* versão 2, todos eles com repetições e regiões de baixa complexidade mascaradas.

### Busca por regiões anônimas

Foram encontrados aproximadamente 247 Mb em regiões anônimas no genoma humano, equivalente a 8% do genoma. Destas regiões, 228 Mb (92,5%) foram mascaradas por serem de baixa complexidade ou representavam bases não identificadas (“N”s). A partir das regiões anônimas restantes (18 Mb, ~0,6% do genoma total) foram extraídos 4 233 locos anônimos putativos, cada um deles com 1 kb de extensão. Os locos putativos encontrados apresentaram uma distribuição cromossomal proporcional ao tamanho da região anônima não mascarada de cada cromossomo (Fig. 2).

### Filtragem por conservação e unicidade

Os 4 233 locos anônimos putativos encontrados no genoma humano foram usados como *query* na busca por homólogos e duplicações em todos os genomas estudados. Nesta busca foram encontrados apenas 304 locos anônimos que apresentam cópia única e alta identidade em cada um dos genomas.

## Análise dos locos anônimos de Hominidae

Do conjunto de 304 ALs gerados foram aleatoriamente selecionados 300 ALs para análise detalhada.

### Mapeamento dos locos anônimos por cromossomo

A distribuição de ALs no genoma foi similar a distribuição de ALs putativos (Fig. 3) apresentando uma relação linear entre o tamanho e o número de ALs para a maioria dos cromossomos. As exeções podem ser explicadas por variações nos tamanhos de regiões anônimas não repetitivas de cada cromossomo (Fig. 2).

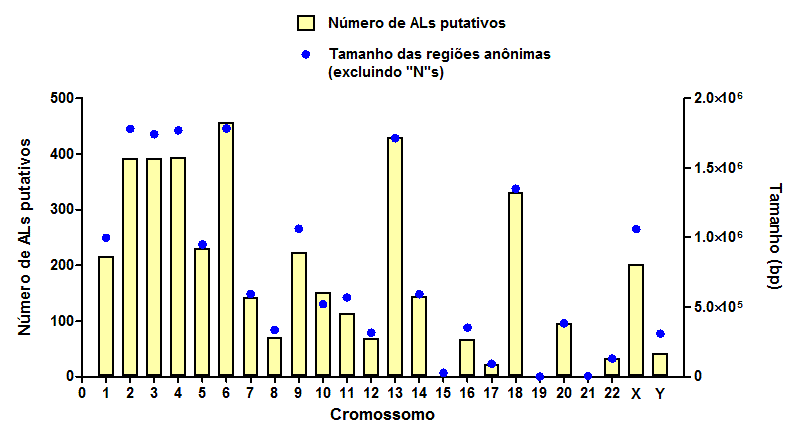


Figura 2: Distribuição dos ALs putativos e regiões anônimas

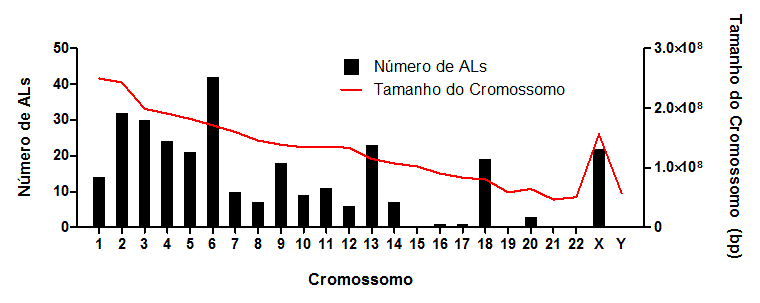


Figura 3: Distribuição dos ALs encontrados

### Modelos de substituição

Os 300 ALs foram submetidos a predição de modelos de substituição usando o programa *modeltest* (Fig. 4). Dentre os 88 modelos possíveis [[30](#_ENREF_30)], a grande maioria dos ALs (210/300) foi mais bem representada pelo modelo HKY (Hasegawa, Kishino e Yano) [[31](#_ENREF_31)] que consiste em apenas cinco parâmetros, um para cada base e um para a taxa de transição/transversão (Ti/Tv). Este resultado demonstra que as regiões anônimas do genoma de Hominidae estão sujeitas, basicamente, a um modo de evolução simples, compatível com a hipótese de evolução neutra.

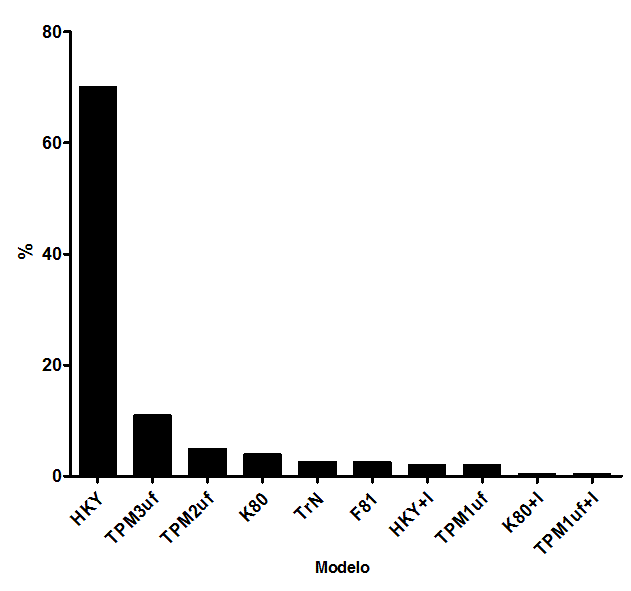


Figura 4: Modelos de substituição preditos

### Filogenia

Na análise filogenética dos 300 ALs, gerando uma árvore enraizada para cada loco, 64% das árvores exibiram a relação esperada entre humanos e chimpanzé (193/300), e por volta de 20% apresentaram as duas topologias alternativas ((H,G),C) e ((C,G),H) (Tabela 1).

Estes resultados concordam com a frequência de topologias esperadas pela teoria da coalescência [[32](#_ENREF_32)] e resultados empiricos publicados [[12](#_ENREF_12)].

### Estimativa da população efetiva e tempo de divergência

As análises de genética populacional foram realizadas em colaboração com o Prof. Bryan Jennings usando o programa BP&P [[33](#_ENREF_33), [34](#_ENREF_34)]. A estimativa dos parâmetros populacionais obteve resultados semelhantes aos já publicados [[12](#_ENREF_12), [35](#_ENREF_35)]. Os resultados foram comparados com os de Chen e Li de 2001 [[12](#_ENREF_12)], que obteve estas estimativas a partir de um conjunto de 53 locos nucleares e é um dos trabalhos mais citados da área.

Foi observado que o intervalo de confiança de 95% das estimativas de tempo de divergência foram reduzidos entre duas a três vezes (Fig. 5) nas estimativas geradas a partir do conjunto de 300 locos. Foram estimados em 4,3 Ma o tempo de divergência entre humanos e chimpanzés e em 12,3 Ma o tempo de divergência da linhagem do orangotango, 0,5 e 1,8 Ma mais recente do que o estimado utilizando o conjunto de 53 locos respectivamente. Ambos conjuntos concordaram no tempo de divergência do gorila em valores próximo a 6 Ma (5,9 utilizando 53 locos e 6,1 utilizando 300).

Para os parâmetros de tamanho efetivo de população ancestral as análises foram feitas usando tempo de geração (TG) variável ou fixo em 20 anos. Analizando o conjunto de 300 locos, as estimativas para o ancestral humano-chimapanzé variaram entre 37 000 e 50 000, dependendo do TG utilizado, enquanto que as estimativas usando 53 locos variaram entre 17 000 e 23 000 (Fig. 6). De modo similar, o tamanho de população efetiva para o ancestral humano, chimpanzé, gorila foi estimada entre 40 000 e 43 000 para todos os conjuntos de dados.

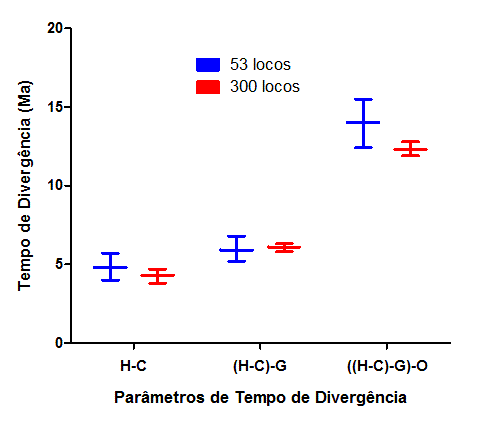


Figura 5: Estimativa do tempo de divergência dos Hominidae

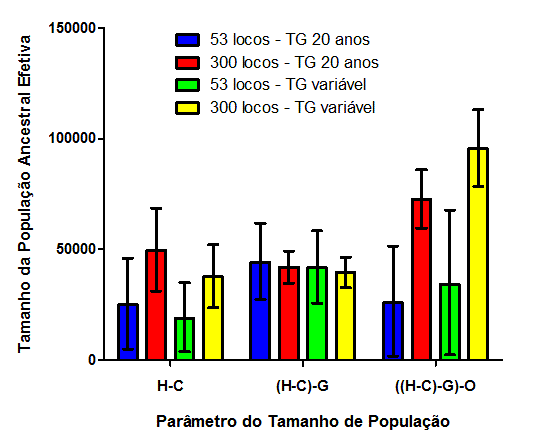


Figura 6: Estimativa do tamanho efetivo de população

Houve, porém, uma diferença considerável nas estimativas para o tamanho de população efetiva da linhagem hominóide ancestral. O *dataset* de 53 locos forneceu uma estimativa variando entre 21 000 e 33 000 enquanto que os valores estimados a partir do conjunto de 300 locos foi bem maior, entre 72 000 e 95 000. Não foram observadas diferenças no intervalo de confiança para a linhagem ancestral humano-chimpanzé, mas as outras duas estimativas (ancestral humano-chimpanzé-gorila e hominóide) tiveram seus intervalos reduzidos pela metade.

Todas estas análises foram repetidas e resultados semelhantes foram obtidos utilizando priores bayesianos exponenciais, demonstrando robustez para a escolha de priores.

### Teste de neutralidade

Os valores da razão transição/transverção (Ti/Tv), que é um dos parâmetros estimados pelo programa *modeltest*, apresentaram uma distribuição unimodal de média 2,3 ± 0,9 (Fig. 7). Esta distribuição é uma evidência de que sitios intergênicos neutros seguem um único modo de evolução.

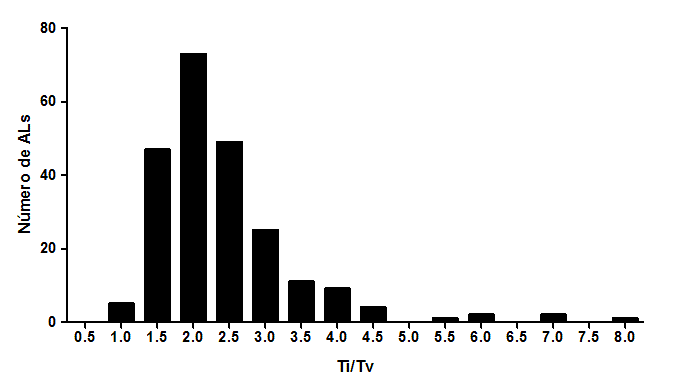


Figura 7: Histograma dos valores de Ti/Tv encontrados

5 Conclusão

Neste trabalho foi desenvolvido um programa que sugere uma solução para o problema da predição de locos anônimos em genomas completos ou parciais usando uma abordagem totalmente computacional (*in silico*). Embora o tempo de desenvolvimento da ferramenta tenha sido de cerca de 3 anos, agora esse problema pode ser resolvido com extrema facilidade em algumas horas, facilitando enormemente o trabalho de busca por locos anônimos. Este programa foi capaz de gerar 300 locos anônimos conservados para o grupo dos Hominidae, utilizando quatro genomas completos. Estes 300 locos foram analisados e foram obtidos resultados compatíveis com trabalhos publicados, validando o programa. Além disso, foi obtido um valor de Ti/Tv médio para as regiões não codificantes de hominóides. Finalmente, foram obtidas estimativas de parâmetros populacionais de hominídeos mais precisos que os já publicados. Esperamos que o nosso trabalho se demonstre como o novo padrão a ser comparado para as estimativas de parâmetros populacionais dos Hominidae.

Anexos

ANEXO A – Decaimento exponencial do custo de sequenciamento



Extraído de <http://www.genome.gov/sequencingcosts/>

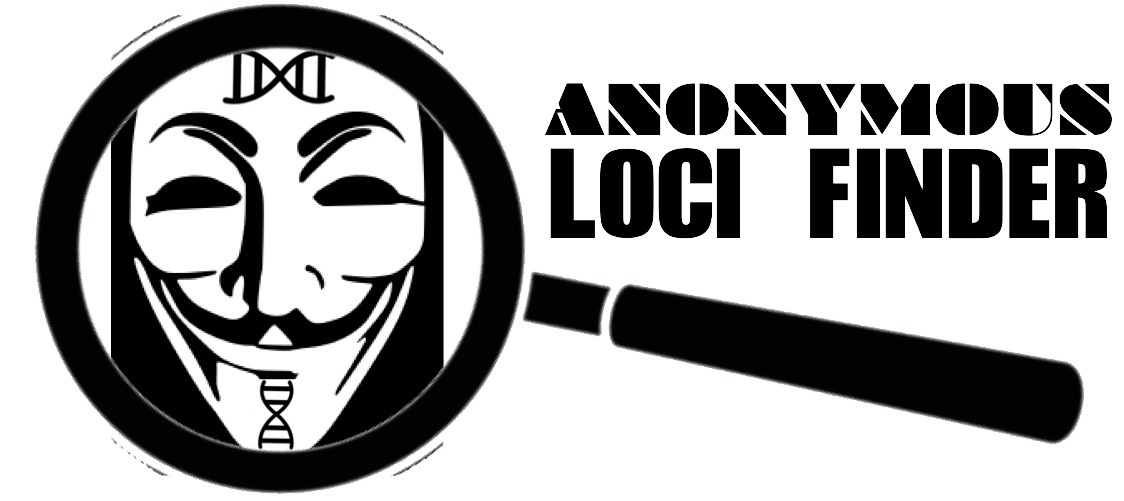
Apêndices

APÊNDICE A – Sumário dos resultados encontrados

Tabela1: Sumário dos resultados encontrados

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ID | Cromossomo | Posição Inicial | Posição Final | Topologia | Ti/Tv | Modelo de Substituição |
| 1 | 1 | 68744514 | 68745513 | ((C,G),H) | 2.77 | HKY+I |
| 5 | 1 | 72507917 | 72508916 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 9 | 1 | 79725749 | 79726748 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 37 | 1 | 88108901 | 88109900 | ((H,G),C) | 1.94 | HKY |
| 50 | 1 | 104474803 | 104475802 | ((H,C),G) | 2.04 | HKY |
| 78 | 1 | 104827235 | 104828234 | ((H,C),G) | N.A. | TPM2uf |
| 89 | 1 | 105036129 | 105037128 | ((H,C),G) | 1.93 | HKY |
| 114 | 1 | 106289093 | 106290092 | ((H,G),C) | N.A. | TPM3uf |
| 132 | 1 | 164141460 | 164142459 | ((H,C),G) | 2.91 | HKY |
| 133 | 1 | 189343013 | 189344012 | ((H,G),C) | 2.39 | HKY |
| 146 | 1 | 191440464 | 191441463 | ((C,G),H) | 1.52 | HKY |
| 172 | 1 | 195326778 | 195327777 | ((H,C),G) | 2.62 | HKY |
| 191 | 1 | 195534484 | 195535483 | ((H,C),G) | 2.07 | HKY |
| 210 | 1 | 195752207 | 195753206 | ((H,C),G) | 0.97 | HKY |
| 219 | 10 | 9508281 | 9509280 | ((H,C),G) | 2.42 | HKY |
| 224 | 10 | 55958449 | 55959448 | ((H,C),G) | 1.78 | HKY |
| 253 | 10 | 56838042 | 56839041 | ((H,G),C) | 1.87 | HKY |
| 259 | 10 | 57715895 | 57716894 | ((H,C),G) | 2.99 | HKY |
| 271 | 10 | 81424322 | 81425321 | ((H,C),G) | 2.12 | HKY |
| 286 | 10 | 81658264 | 81659263 | ((C,G),H) | 2.10 | HKY |
| 289 | 10 | 111724861 | 111725860 | ((H,C),G) | N.A. | TPM2uf |
| 294 | 10 | 128524321 | 128525320 | ((H,C),G) | 2.86 | K80 |
| 347 | 10 | 130727396 | 130728395 | ((H,C),G) | 3.70 | HKY |
| 374 | 11 | 21845057 | 21846056 | ((H,C),G) | N.A. | TPM2uf |
| 383 | 11 | 36910115 | 36911114 | ((H,C),G) | 1.46 | HKY |
| 397 | 11 | 37495524 | 37496523 | ((H,C),G) | N.A. | TrN |
| 398 | 11 | 38884861 | 38885860 | ((H,G),C) | 2.19 | HKY |
| 405 | 11 | 39465300 | 39466299 | ((C,G),H) | 2.00 | HKY+I |
| 410 | 11 | 42463677 | 42464676 | ((H,C),G) | 2.17 | HKY |
| 434 | 11 | 42665603 | 42666602 | ((H,C),G) | 2.35 | HKY |
| 439 | 11 | 81337312 | 81338311 | ((H,C),G) | 2.26 | HKY |
| 444 | 11 | 91385993 | 91386992 | ((H,C),G) | 2.27 | HKY |
| 463 | 11 | 114918045 | 114919044 | ((H,C),G) | 3.49 | K80 |
| 465 | 11 | 116164046 | 116165045 | ((H,C),G) | 3.19 | K80 |
| 484 | 12 | 60626720 | 60627719 | ((H,C),G) | 3.38 | HKY |
| 498 | 12 | 60835126 | 60836125 | ((H,C),G) | 2.38 | HKY |
| 519 | 12 | 73426393 | 73427392 | ((H,G),C) | 1.87 | HKY |
| 526 | 12 | 83386945 | 83387944 | ((C,G),H) | 3.26 | HKY |
| 540 | 12 | 83931107 | 83932106 | ((C,G),H) | 2.75 | HKY |
| 546 | 12 | 87382934 | 87383933 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 554 | 13 | 22482509 | 22483508 | ((H,C),G) | 2.25 | HKY |
| 560 | 13 | 55793867 | 55794866 | ((C,G),H) | N.A. | TPM3uf |
| 567 | 13 | 56484628 | 56485627 | ((C,G),H) | N.A. | F81 |
| 585 | 13 | 64296706 | 64297705 | ((H,C),G) | 2.82 | HKY |
| 614 | 13 | 65510955 | 65511954 | ((H,C),G) | 1.21 | HKY |
| 621 | 13 | 72179360 | 72180359 | ((H,C),G) | 4.68 | HKY |
| 631 | 13 | 76351053 | 76352052 | ((C,G),H) | 2.85 | HKY |
| 664 | 13 | 76597135 | 76598134 | ((C,G),H) | 1.47 | HKY |
| 679 | 13 | 80132695 | 80133694 | ((H,C),G) | 1.63 | K80 |
| 683 | 13 | 81931238 | 81932237 | ((C,G),H) | 2.65 | HKY |
| 704 | 13 | 82143317 | 82144316 | ((H,C),G) | N.A. | TPM2uf |
| 727 | 13 | 82490030 | 82491029 | ((C,G),H) | 2.05 | HKY |
| 742 | 13 | 83507578 | 83508577 | ((H,C),G) | 1.16 | HKY |
| 760 | 13 | 84227523 | 84228522 | ((C,G),H) | 4.08 | HKY |
| 773 | 13 | 84799327 | 84800326 | ((H,C),G) | 1.61 | HKY |
| 782 | 13 | 86488112 | 86489111 | ((H,C),G) | 2.12 | HKY |
| 784 | 13 | 103650785 | 103651784 | ((H,G),C) | 2.62 | HKY |
| 821 | 13 | 103849493 | 103850492 | ((C,G),H) | 2.27 | HKY |
| 857 | 13 | 104061299 | 104062298 | ((H,C),G) | 1.01 | HKY |
| 892 | 13 | 104295286 | 104296285 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 923 | 13 | 104498915 | 104499914 | ((H,C),G) | 1.84 | HKY |
| 944 | 13 | 105015903 | 105016902 | ((H,C),G) | 2.26 | HKY |
| 979 | 13 | 105238455 | 105239454 | ((C,G),H) | 3.24 | HKY |
| 996 | 14 | 39737967 | 39738966 | ((H,C),G) | N.A. | TPM2uf |
| 1023 | 14 | 39973727 | 39974726 | ((H,C),G) | 2.03 | HKY |
| 1050 | 14 | 40602287 | 40603286 | ((H,G),C) | N.A. | TPM3uf |
| 1067 | 14 | 83271762 | 83272761 | ((C,G),H) | 1.98 | HKY |
| 1086 | 14 | 83474393 | 83475392 | ((C,G),H) | 2.05 | HKY |
| 1098 | 14 | 84399968 | 84400967 | ((H,C),G) | 1.87 | HKY |
| 1122 | 14 | 86632388 | 86633387 | ((C,G),H) | 1.37 | HKY |
| 1182 | 16 | 61262633 | 61263632 | ((H,G),C) | N.A. | TPM2uf |
| 1219 | 17 | 54255285 | 54256284 | ((C,G),H) | N.A. | TPM2uf |
| 1222 | 18 | 25563441 | 25564440 | ((C,G),H) | 3.17 | K80 |
| 1233 | 18 | 28395826 | 28396825 | ((H,C),G) | 2.73 | HKY |
| 1240 | 18 | 30143273 | 30144272 | ((H,C),G) | 2.09 | HKY+I |
| 1272 | 18 | 30353880 | 30354879 | ((H,G),C) | 1.50 | HKY |
| 1290 | 18 | 37895673 | 37896672 | ((H,C),G) | 4.63 | HKY |
| 1323 | 18 | 38095162 | 38096161 | ((H,C),G) | 2.15 | HKY |
| 1340 | 18 | 38297158 | 38298157 | ((H,G),C) | 3.19 | HKY |
| 1364 | 18 | 40349006 | 40350005 | ((H,C),G) | 2.94 | HKY |
| 1405 | 18 | 40556148 | 40557147 | ((H,G),C) | 1.78 | HKY |
| 1428 | 18 | 40741304 | 40742303 | ((H,C),G) | N.A. | TPM2uf |
| 1465 | 18 | 40949070 | 40950069 | ((H,C),G) | 1.47 | K80 |
| 1493 | 18 | 41226829 | 41227828 | ((H,G),C) | 2.67 | HKY |
| 1501 | 18 | 43540271 | 43541270 | ((H,C),G) | 2.04 | HKY |
| 1517 | 18 | 52113203 | 52114202 | ((H,C),G) | 1.82 | HKY |
| 1519 | 18 | 53837849 | 53838848 | ((H,C),G) | 2.40 | HKY |
| 1528 | 18 | 61127278 | 61128277 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 1531 | 18 | 64883353 | 64884352 | ((H,C),G) | 7.76 | HKY |
| 1533 | 18 | 66281153 | 66282152 | ((H,C),G) | 2.34 | HKY |
| 1537 | 18 | 72159816 | 72160815 | ((H,C),G) | 1.62 | HKY |
| 1553 | 2 | 13219366 | 13220365 | ((H,G),C) | 1.66 | HKY |
| 1564 | 2 | 35997192 | 35998191 | ((H,C),G) | 2.77 | HKY |
| 1583 | 2 | 41375562 | 41376561 | ((H,C),G) | 3.29 | HKY |
| 1591 | 2 | 49498606 | 49499605 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 1618 | 2 | 53114436 | 53115435 | ((H,G),C) | N.A. | TPM2uf |
| 1642 | 2 | 116115936 | 116116935 | ((H,C),G) | 1.14 | HKY |
| 1655 | 2 | 116330528 | 116331527 | ((H,C),G) | 2.63 | HKY |
| 1670 | 2 | 117411742 | 117412741 | ((H,G),C) | 1.46 | HKY |
| 1685 | 2 | 118431064 | 118432063 | ((H,C),G) | 1.93 | HKY |
| 1711 | 2 | 118610736 | 118611735 | ((C,G),H) | 3.26 | K80 |
| 1715 | 2 | 122000479 | 122001478 | ((H,C),G) | 2.13 | HKY |
| 1728 | 2 | 122203140 | 122204139 | ((H,C),G) | 2.18 | HKY |
| 1750 | 2 | 122422345 | 122423344 | ((H,C),G) | 3.79 | HKY |
| 1772 | 2 | 122652643 | 122653642 | ((H,G),C) | 3.43 | HKY |
| 1783 | 2 | 122861233 | 122862232 | ((C,G),H) | N.A. | TPM3uf |
| 1785 | 2 | 125207247 | 125208246 | ((H,C),G) | 2.10 | HKY |
| 1805 | 2 | 125423956 | 125424955 | ((H,C),G) | 1.42 | HKY |
| 1812 | 2 | 128787322 | 128788321 | ((H,G),C) | 2.41 | HKY |
| 1823 | 2 | 133802185 | 133803184 | ((H,C),G) | 1.33 | K80 |
| 1832 | 2 | 139144319 | 139145318 | ((H,G),C) | 2.10 | HKY |
| 1834 | 2 | 147101848 | 147102847 | ((H,C),G) | 2.24 | HKY |
| 1847 | 2 | 155543931 | 155544930 | ((H,C),G) | 2.27 | HKY |
| 1882 | 2 | 155755037 | 155756036 | ((H,C),G) | 2.43 | HKY |
| 1891 | 2 | 180240600 | 180241599 | ((H,C),G) | 1.38 | HKY |
| 1894 | 2 | 184174075 | 184175074 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 1898 | 2 | 185164829 | 185165828 | ((H,C),G) | N.A. | F81 |
| 1915 | 2 | 192405374 | 192406373 | ((H,C),G) | 2.03 | HKY |
| 1924 | 2 | 192995547 | 192996546 | ((C,G),H) | 2.50 | HKY |
| 1930 | 2 | 193482992 | 193483991 | ((H,C),G) | 1.97 | HKY |
| 1936 | 2 | 195241727 | 195242726 | ((H,C),G) | 1.56 | HKY |
| 1937 | 2 | 210880132 | 210881131 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 1940 | 2 | 226422985 | 226423984 | ((H,C),G) | 2.17 | HKY |
| 1945 | 20 | 12581284 | 12582283 | ((H,G),C) | 1.91 | HKY |
| 2035 | 20 | 39552847 | 39553846 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 2041 | 20 | 55782618 | 55783617 | ((H,C),G) | 1.40 | HKY |
| 2075 | 3 | 5463141 | 5464140 | ((H,C),G) | N.A. | TrN |
| 2089 | 3 | 5677111 | 5678110 | ((H,C),G) | 2.83 | K80+I |
| 2095 | 3 | 20723443 | 20724442 | ((H,G),C) | 1.67 | HKY |
| 2110 | 3 | 20930151 | 20931150 | ((H,G),C) | 2.97 | HKY |
| 2112 | 3 | 70512728 | 70513727 | ((H,C),G) | 3.28 | HKY |
| 2118 | 3 | 74764327 | 74765326 | ((H,C),G) | 6.75 | HKY |
| 2131 | 3 | 83010946 | 83011945 | ((H,C),G) | 1.81 | HKY |
| 2159 | 3 | 83211631 | 83212630 | ((H,G),C) | 2.34 | HKY |
| 2178 | 3 | 83415546 | 83416545 | ((H,C),G) | 2.11 | HKY |
| 2196 | 3 | 83620650 | 83621649 | ((C,G),H) | 1.67 | HKY |
| 2211 | 3 | 89792169 | 89793168 | ((H,C),G) | N.A. | TrN |
| 2239 | 3 | 94708276 | 94709275 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 2246 | 3 | 95396204 | 95397203 | ((H,C),G) | 1.44 | HKY |
| 2256 | 3 | 95897114 | 95898113 | ((C,G),H) | N.A. | TPM3uf |
| 2265 | 3 | 103847850 | 103848849 | ((H,G),C) | N.A. | TPM3uf |
| 2267 | 3 | 106069554 | 106070553 | ((H,C),G) | N.A. | TrN |
| 2272 | 3 | 110185193 | 110186192 | ((H,C),G) | 2.73 | HKY |
| 2287 | 3 | 117339812 | 117340811 | ((C,G),H) | 1.34 | HKY |
| 2289 | 3 | 135672541 | 135673540 | ((C,G),H) | 3.68 | K80 |
| 2293 | 3 | 137217173 | 137218172 | ((H,C),G) | 2.23 | HKY |
| 2308 | 3 | 144404890 | 144405889 | ((H,C),G) | N.A. | TPM1uf |
| 2328 | 3 | 144605905 | 144606904 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 2352 | 3 | 144823203 | 144824202 | ((H,C),G) | 1.46 | HKY |
| 2378 | 3 | 145091788 | 145092787 | ((H,C),G) | 2.77 | HKY |
| 2402 | 3 | 145304167 | 145305166 | ((H,G),C) | N.A. | TPM3uf |
| 2406 | 3 | 162026067 | 162027066 | ((C,G),H) | 1.91 | HKY |
| 2437 | 3 | 162235127 | 162236126 | ((H,G),C) | N.A. | TPM2uf |
| 2450 | 3 | 163764888 | 163765887 | ((H,G),C) | 2.21 | HKY |
| 2454 | 3 | 164405624 | 164406623 | ((H,C),G) | 1.61 | HKY |
| 2464 | 3 | 176351409 | 176352408 | ((H,C),G) | 2.63 | HKY |
| 2473 | 4 | 10943393 | 10944392 | ((H,C),G) | 2.21 | K80 |
| 2483 | 4 | 11138281 | 11139280 | ((H,C),G) | 1.27 | HKY |
| 2484 | 4 | 18247486 | 18248485 | ((H,G),C) | 2.37 | HKY |
| 2487 | 4 | 18689510 | 18690509 | ((H,C),G) | N.A. | TrN |
| 2497 | 4 | 18894844 | 18895843 | ((H,C),G) | N.A. | TPM2uf |
| 2507 | 4 | 24114292 | 24115291 | ((H,C),G) | 2.47 | HKY |
| 2539 | 4 | 30434197 | 30435196 | ((C,G),H) | 1.97 | HKY |
| 2552 | 4 | 32564007 | 32565006 | ((C,G),H) | 1.63 | HKY |
| 2574 | 4 | 32765487 | 32766486 | ((H,G),C) | N.A. | TPM1uf |
| 2582 | 4 | 35175679 | 35176678 | ((H,C),G) | 1.91 | HKY |
| 2595 | 4 | 45732389 | 45733388 | ((C,G),H) | 4.08 | HKY |
| 2605 | 4 | 60037725 | 60038724 | ((H,C),G) | 2.50 | HKY |
| 2625 | 4 | 60258127 | 60259126 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 2648 | 4 | 63695828 | 63696827 | ((H,C),G) | 1.93 | HKY |
| 2665 | 4 | 63893286 | 63894285 | ((H,C),G) | 2.02 | HKY |
| 2686 | 4 | 67106369 | 67107368 | ((H,C),G) | 2.46 | HKY |
| 2700 | 4 | 114310805 | 114311804 | ((H,C),G) | 2.02 | HKY |
| 2715 | 4 | 115347616 | 115348615 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 2725 | 4 | 124935714 | 124936713 | ((H,G),C) | 2.38 | HKY |
| 2746 | 4 | 126314160 | 126315159 | ((H,G),C) | 2.00 | HKY |
| 2761 | 4 | 129505308 | 129506307 | ((C,G),H) | 2.88 | HKY |
| 2768 | 4 | 130169222 | 130170221 | ((H,C),G) | N.A. | TPM2uf |
| 2784 | 4 | 160183891 | 160184890 | ((H,C),G) | N.A. | TPM1uf |
| 2835 | 4 | 180211863 | 180212862 | ((C,G),H) | 2.41 | HKY |
| 2879 | 5 | 2514990 | 2515989 | ((H,C),G) | 2.62 | HKY+I |
| 2886 | 5 | 3803204 | 3804203 | ((H,C),G) | 2.07 | HKY |
| 2900 | 5 | 5807182 | 5808181 | ((H,C),G) | 2.85 | K80 |
| 2906 | 5 | 27780120 | 27781119 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 2916 | 5 | 30631523 | 30632522 | ((H,C),G) | 1.42 | HKY |
| 2939 | 5 | 30850307 | 30851306 | ((H,C),G) | 2.37 | HKY |
| 2950 | 5 | 51684176 | 51685175 | ((H,C),G) | N.A. | F81 |
| 2954 | 5 | 63548670 | 63549669 | ((H,C),G) | 2.09 | HKY |
| 2975 | 5 | 63751670 | 63752669 | ((C,G),H) | 1.88 | HKY |
| 2976 | 5 | 84706636 | 84707635 | ((H,C),G) | 2.08 | HKY |
| 2995 | 5 | 87949953 | 87950952 | ((H,C),G) | N.A. | F81 |
| 3003 | 5 | 99241732 | 99242731 | ((H,G),C) | N.A. | TPM3uf |
| 3015 | 5 | 103813829 | 103814828 | ((H,C),G) | 4.25 | HKY |
| 3023 | 5 | 105633320 | 105634319 | ((C,G),H) | 1.75 | HKY |
| 3032 | 5 | 106129658 | 106130657 | ((H,C),G) | 1.65 | HKY |
| 3040 | 5 | 110086427 | 110087426 | ((H,G),C) | N.A. | TPM2uf |
| 3041 | 5 | 113824045 | 113825044 | ((H,G),C) | 1.70 | HKY |
| 3046 | 5 | 119917448 | 119918447 | ((H,C),G) | 1.44 | HKY |
| 3060 | 5 | 123845234 | 123846233 | ((H,C),G) | 2.54 | HKY |
| 3077 | 5 | 144751618 | 144752617 | ((H,C),G) | 1.73 | HKY |
| 3082 | 5 | 166598000 | 166598999 | ((C,G),H) | 3.46 | HKY |
| 3093 | 6 | 9378117 | 9379116 | ((H,C),G) | 2.78 | HKY |
| 3097 | 6 | 18780959 | 18781958 | ((C,G),H) | 1.65 | HKY |
| 3117 | 6 | 48415235 | 48416234 | ((H,C),G) | 1.34 | HKY |
| 3138 | 6 | 66315472 | 66316471 | ((C,G),H) | 3.97 | HKY |
| 3160 | 6 | 66933522 | 66934521 | ((H,C),G) | 2.22 | HKY |
| 3163 | 6 | 76986504 | 76987503 | ((C,G),H) | 2.79 | HKY |
| 3183 | 6 | 78164459 | 78165458 | ((H,C),G) | N.A. | F81 |
| 3200 | 6 | 78390820 | 78391819 | ((C,G),H) | 2.80 | HKY |
| 3204 | 6 | 80763831 | 80764830 | ((C,G),H) | 1.49 | HKY |
| 3221 | 6 | 80988597 | 80989596 | ((H,C),G) | 2.04 | HKY |
| 3243 | 6 | 81229063 | 81230062 | ((H,G),C) | 2.20 | HKY |
| 3249 | 6 | 82578541 | 82579540 | ((H,G),C) | 2.26 | HKY |
| 3263 | 6 | 90793821 | 90794820 | ((H,C),G) | 2.02 | HKY |
| 3305 | 6 | 90999441 | 91000440 | ((C,G),H) | 2.28 | HKY |
| 3339 | 6 | 93652222 | 93653221 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 3342 | 6 | 94649346 | 94650345 | ((H,G),C) | 1.62 | HKY |
| 3358 | 6 | 94858271 | 94859270 | ((H,C),G) | 1.93 | HKY |
| 3371 | 6 | 95006333 | 95007332 | ((H,C),G) | 3.97 | HKY |
| 3377 | 6 | 95096367 | 95097366 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 3380 | 6 | 95106016 | 95107015 | ((H,G),C) | 2.30 | HKY |
| 3384 | 6 | 95120342 | 95121341 | ((H,G),C) | N.A. | TPM3uf |
| 3385 | 6 | 95122099 | 95123098 | ((H,C),G) | 2.48 | HKY |
| 3386 | 6 | 95126619 | 95127618 | ((H,C),G) | N.A. | F81 |
| 3387 | 6 | 95128722 | 95129721 | ((H,C),G) | 6.10 | HKY |
| 3393 | 6 | 95174381 | 95175380 | ((H,C),G) | 1.59 | HKY+I |
| 3395 | 6 | 95186508 | 95187507 | ((H,C),G) | 6.07 | HKY |
| 3396 | 6 | 95206851 | 95207850 | ((H,G),C) | N.A. | TPM1uf |
| 3397 | 6 | 95217561 | 95218560 | ((H,C),G) | 1.55 | HKY |
| 3401 | 6 | 95231796 | 95232795 | ((H,C),G) | 4.05 | HKY |
| 3410 | 6 | 95276070 | 95277069 | ((H,C),G) | 3.14 | HKY |
| 3415 | 6 | 101107652 | 101108651 | ((H,C),G) | 1.93 | HKY |
| 3425 | 6 | 103207185 | 103208184 | ((H,C),G) | 2.58 | HKY |
| 3443 | 6 | 103798086 | 103799085 | ((H,C),G) | 3.04 | HKY |
| 3446 | 6 | 104226765 | 104227764 | ((H,G),C) | 2.15 | HKY |
| 3473 | 6 | 104433238 | 104434237 | ((H,G),C) | N.A. | TrN |
| 3481 | 6 | 115094761 | 115095760 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 3487 | 6 | 119549763 | 119550762 | ((H,C),G) | 2.13 | HKY |
| 3515 | 6 | 119738103 | 119739102 | ((C,G),H) | 4.06 | HKY |
| 3523 | 6 | 126885903 | 126886902 | ((H,G),C) | 1.56 | HKY |
| 3530 | 6 | 141846722 | 141847721 | ((H,C),G) | N.A. | TPM1uf |
| 3534 | 6 | 145061120 | 145062119 | ((H,G),C) | 2.10 | HKY |
| 3546 | 6 | 156146881 | 156147880 | ((H,G),C) | 2.18 | K80 |
| 3556 | 7 | 41359684 | 41360683 | ((H,C),G) | 2.83 | HKY |
| 3573 | 7 | 42451678 | 42452677 | ((H,C),G) | 2.20 | HKY |
| 3577 | 7 | 49468643 | 49469642 | ((H,C),G) | 1.63 | HKY |
| 3589 | 7 | 52474207 | 52475206 | ((H,C),G) | 2.70 | HKY |
| 3625 | 7 | 52690817 | 52691816 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 3661 | 7 | 85888782 | 85889781 | ((H,G),C) | N.A. | F81 |
| 3677 | 7 | 113632664 | 113633663 | ((H,C),G) | 3.41 | HKY |
| 3681 | 7 | 118671413 | 118672412 | ((H,C),G) | 2.53 | HKY |
| 3683 | 7 | 125669627 | 125670626 | ((H,C),G) | N.A. | TPM2uf |
| 3686 | 7 | 145883492 | 145884491 | ((C,G),H) | 1.55 | HKY |
| 3694 | 8 | 76000407 | 76001406 | ((H,C),G) | 2.94 | HKY |
| 3707 | 8 | 77781402 | 77782401 | ((H,C),G) | 1.49 | HKY |
| 3727 | 8 | 83659161 | 83660160 | ((H,C),G) | N.A. | TPM1uf |
| 3737 | 8 | 89010429 | 89011428 | ((C,G),H) | 2.28 | HKY |
| 3741 | 8 | 114534601 | 114535600 | ((C,G),H) | N.A. | TPM1uf+I |
| 3749 | 8 | 114992073 | 114993072 | ((H,G),C) | 6.80 | HKY+I |
| 3761 | 8 | 141723200 | 141724199 | ((C,G),H) | 2.23 | HKY |
| 3766 | 9 | 1536428 | 1537427 | ((H,C),G) | 4.46 | HKY |
| 3783 | 9 | 1743015 | 1744014 | ((H,G),C) | 1.71 | HKY |
| 3789 | 9 | 11850793 | 11851792 | ((H,C),G) | 2.10 | HKY |
| 3794 | 9 | 13705376 | 13706375 | ((H,C),G) | 4.05 | HKY |
| 3800 | 9 | 18009516 | 18010515 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 3830 | 9 | 23189453 | 23190452 | ((H,C),G) | 1.59 | HKY |
| 3860 | 9 | 23412105 | 23413104 | ((H,C),G) | N.A. | F81 |
| 3863 | 9 | 24157509 | 24158508 | ((H,G),C) | N.A. | TPM3uf |
| 3882 | 9 | 25351936 | 25352935 | ((H,G),C) | 1.76 | HKY |
| 3890 | 9 | 26382945 | 26383944 | ((H,C),G) | N.A. | TrN |
| 3896 | 9 | 30093346 | 30094345 | ((C,G),H) | 2.05 | HKY |
| 3922 | 9 | 30356760 | 30357759 | ((C,G),H) | N.A. | TPM3uf |
| 3923 | 9 | 31849777 | 31850776 | ((H,C),G) | 1.65 | HKY |
| 3937 | 9 | 32044149 | 32045148 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 3955 | 9 | 74083427 | 74084426 | ((H,C),G) | 1.84 | HKY |
| 3964 | 9 | 81075848 | 81076847 | ((C,G),H) | 2.61 | HKY |
| 3975 | 9 | 118356705 | 118357704 | ((H,C),G) | N.A. | TPM2uf |
| 3989 | 9 | 119729136 | 119730135 | ((C,G),H) | 2.30 | HKY |
| 4019 | X | 7624243 | 7625242 | ((H,G),C) | 2.10 | HKY |
| 4024 | X | 20680056 | 20681055 | ((H,C),G) | 2.14 | HKY |
| 4036 | X | 20896970 | 20897969 | ((H,C),G) | 1.92 | HKY |
| 4043 | X | 35320455 | 35321454 | ((H,C),G) | 1.35 | HKY |
| 4050 | X | 66898623 | 66899622 | ((H,C),G) | 1.90 | HKY |
| 4058 | X | 67116446 | 67117445 | ((H,C),G) | N.A. | TrN |
| 4062 | X | 79697749 | 79698748 | ((H,G),C) | 2.10 | HKY |
| 4066 | X | 82207815 | 82208814 | ((H,C),G) | 2.33 | HKY |
| 4072 | X | 83274809 | 83275808 | ((H,C),G) | 2.72 | HKY |
| 4075 | X | 85589655 | 85590654 | ((H,C),G) | 3.80 | HKY |
| 4087 | X | 91096066 | 91097065 | ((H,G),C) | 1.68 | HKY |
| 4110 | X | 98888588 | 98889587 | ((H,C),G) | 2.28 | HKY |
| 4135 | X | 99170074 | 99171073 | ((C,G),H) | 2.54 | HKY |
| 4138 | X | 117612134 | 117613133 | ((H,C),G) | 2.46 | HKY |
| 4143 | X | 121580764 | 121581763 | ((H,C),G) | 1.52 | HKY |
| 4149 | X | 122213105 | 122214104 | ((H,C),G) | N.A. | TPM3uf |
| 4153 | X | 125866857 | 125867856 | ((H,C),G) | 1.63 | HKY |
| 4155 | X | 127094708 | 127095707 | ((H,C),G) | 1.78 | HKY |
| 4160 | X | 137895295 | 137896294 | ((H,C),G) | 5.25 | HKY |
| 4177 | X | 138145219 | 138146218 | ((H,G),C) | 2.53 | HKY |
| 4181 | X | 142823291 | 142824290 | ((C,G),H) | N.A. | TPM3uf |
| 4184 | X | 144511738 | 144512737 | ((H,C),G) | 1.53 | HKY |

APÊNDICE B – Manual do pacote alfie

****

**Alfie 1.0**

**A package for nuclear anonymous loci prediction and phylogenomic analysis using complete genomes**

Igor Rodrigues da Costa

William Bryan Jennings

Francisco Prosdocimi

LAMPADA

LAboratório Multidisciplinar Para Análise de Dados

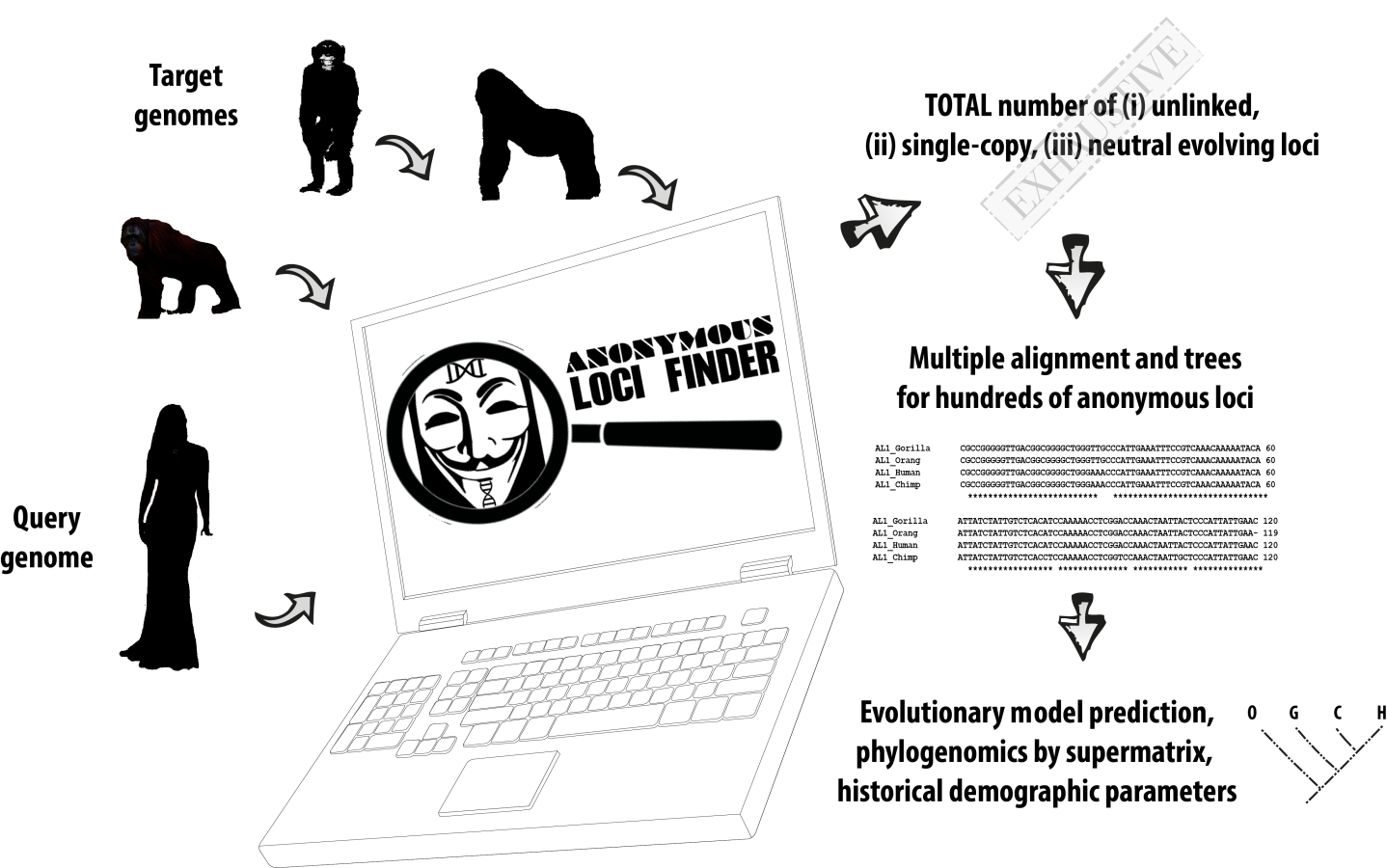
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Instituto de Bioquímica Médica Leopoldo de Meis

Rio de Janeiro, 2015

1. **Introduction**
   1. **What is alfie?**

Alfie is an open-source python package containing a pipeline that searchs for single-copy, neutral evolving and non-linked anonymous loci. In other words, it looks for non-coding loci with a set of characteristics which makes them perfect for **phylogenomics** and **populational genetic** analyses. The goal of alfie is to be a complete, user-friendly and flexible anonymous loci predictor.



* 1. **How it works?**

Alfie utilises a sequential modular approach, with each step of the pipeline being stored in a single module that can be excecuted with greater flexibility in standalone mode. Many of these steps require external programs, such as BLAST or CLUSTALW. To reduce the complexity of the steps the whole pipeline can be run automatically using the afie.py script.

Using as input a single query genome and its associated GTF file, alfie finds all anonymous regions distant from genomic features (>200 kb distance, by default) to avoid the effect of genetic linkage. After the initial anonymous regions have been found, they are split in small pieces (default 1 kb). Each piece is searched against subject and query genomes to filter duplications and find orthologous regions in all genomes.

Alfie performs an exhaustive search, *i. e*., it finds every possible anonymous regions for the specified parameters in the genomes analyzed. Using default parameters and closelly related vertebrate genomes, alfie will usually find 100 - 1000 anonymous loci. Each ortholog group of anonymous region is written in NEXUS, PHYLIP, ALN and FASTA formats. Alfie will also concatenatenate all the alignments into a large file for phylogenomic analysis. The package comes with support for running phylogenomics and population genetics software.

* 1. **What to use alfie for?**

Alfie was developed to find hundreds to thousands of independent, nuclear markers among whole complete genomes and facilitate population genomics studies. An usual user case would use four to ten closely related genomes (we recommend no more than 20 million years of divergence to allow precise ortholog assignment). As an example, we were able to find about 300 anonymous loci with ortologues in all four hominoid genomes used (human, chimpanzee, gorilla and orangutan).

It is strongly recommended that at least one of the genomes have been extensively studied and annotated, presenting a comprehensive GTF file that describes the precise location of the main features targeted by natural selection, such as genes and regulatory elements.

1. **Installation**
   1. **Downloading alfie**

Users can either download and install the entire source code from github at the address <https://github.com/igorrcosta/alfie/archive/master.zip> or download the docker container with all the dependencies included (available soon). To install, simply extract the donwloaded repository file in a folder.

* 1. **Installation requirements**

Working versions for each required program can be found on the following links:

Blast: [http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi?CMD=Web&PAGE\_TYPE=Blast Docs&DOC\_TYPE=Download](http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi?CMD=Web&PAGE_TYPE=Blast%20Docs&DOC_TYPE=Download)

ClustalW: <http://sourceforge.net/projects/mira-assembler/>

PhyML: <http://www.atgc-montpellier.fr/phyml/binaries.php>

ModelTest: <https://code.google.com/p/jmodeltest2/>

Biopython**:** <http://biopython.org/wiki/Download>

* 1. **Testing your installation**

You can test your installation by running alfie on the human and chimpanzee Y chromossomes’ test case. To do that, go to the alfie folder and run the following command:

$> python alfie.py -i test/homo\_y.fasta test/pan\_y.fasta -g test/y.gtf

This command might take more than a minute to finish, depending on your computer speed. A successful run will output 42 candidate loci in the test.fasta file, of which only loci 11, 27 and 40 will be selected and aligned.

1. **Quick Run**

To run alfie, you will need a reference genome and gtf file (there are several available at <http://www.ensembl.org/info/data/ftp/index.html>) and some genomes to compare against the reference. Example command line:

$> python alfie.py –i \*reference\_genome.fasta\* \*genome2.fasta\* \*genome3.fasta\* -g \*annotation\_file.gtf\* -o \*output\_folder\*

Here the \*.fasta\* represents the path to the genome files in FASTA format, \*annotation\_file.gtf\* is the path to the gtf file and \*output\_folder\* is where the loci will be saved.

This command will find several candidade loci in the reference genome, which will be stored at a test.fasta file. This candidade loci will be blasted against all genomes and the final loci will be saved in several formats.

1. **Advanced parameters**

While alfie can be executed with good results without any additional configuration, there are several options to flexibilize your analysis:

|  |  |
| --- | --- |
| -i, --genomes | Path to the genome files in the FASTA format. The first genome file inserted will be considered the reference genome. |
| -g, --gtf | Path to the gtf file relative to the reference genome. |
| -o, --outpath | Path where all output files will be saved. |
| -f, --skip\_formatdb | Skip making BLAST databases, use databses from the last run. Can significantly improve analysis speed. |
| --locus\_length | Length of the anonymous loci (default 1000 bp). You may increase this length if you are planning to predict primers for these loci. |
| --max\_n | Maximum percentage of N's in the AL sequence (default 0%). Increase this if you want to find more loci in a low quality reference genome. |
| --inter\_distance | Minimum distance between ALs (defaut 200000 bp). |
| --gene\_distance | Minimum distance between ALs and genes (default 200000 bp). You can use negative numbers to find loci close to the gene regions, for example, -2000 will find loci between 0-2000 bp from genes |
| --end\_distance | Minimum distance between ALs and the telomeres (default 10000 bp). |
| --gene\_locus | Use this flag to find loci inside the gene regions (will ignore the gene\_distance flag). |
| --cds | Only considers the CDS features of GTF files, ignoring all pseudogens, miRNA, etc. |
| --duplication\_cutoff | ALs with 2 hits with identity higher than this will be considered duplicated (default: 50%). |
| --identity\_cutoff | ALs with a identity higher than this will be considered homologous (default: 90%). |
| --coverage\_cutoff | BLAST hits must have at least this much %coverage to be considered hits (default: 90%). |
| --chromossomes | Chromossomes to be excluded. We recommend excluding all sex chromossomes. |
| --min\_align | Minimum final alignment length (default 900 bp). This will exclude loci that have many Ns in genomes other than the reference. |
| --remove\_gaps | Remove gaps from the final alignment. |

1. **Citing us**

If you use this program in your analysis, please cite it as:

Costa IR, Prosdocimi F, Jennings WB (2015). *in silico* Phylogenomics Comes of Age: Using Bioinformatic Algorithms to Discover Evolutionary Markers in Whole Genome Datasets. Manuscript in preparation.

**Thank you for downloading Alfie !**

APÊNDICE C – Manuscrito em preparação

***in silico* Phylogenomics Comes of Age: Using Bioinformatic Algorithms to Discover Evolutionary Markers in Whole Genome Datasets**

Igor Rodrigues da Costa1\*, Francisco Prosdocimi1\*, W. Bryan Jennings2

1Laboratório de Genômica e Biodiversidade, Instituto de Bioquímica Médica Leopoldo de Meis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil.

2Departamento de Vertebrados, Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 20940-040, Brazil.

\* These authors contributed equally to this work

Abstract: The increasing availability of complete genome data for eukaryotic organisms is facilitating the acquisition of large numbers of presumably single-copy, selectively neutral, and independently assorting DNA sequence loci for coalescent-based phylogenomic analyses. Nevertheless the process of discovering these so-called “anonymous loci”, obtaining comparable sequences from other genomes, and assembling multiple sequence alignments remains piecemeal and arduous. We designed a bioinformatics algorithm that performs these tasks and outputs the datasets in ready-to-analyze formats. The utility of our algorithm is demonstrated by applying it to the hominoids. Starting with complete genome data for human, chimpanzee, gorilla, and orangutan, our algorithm found an exhaustive dataset of 300 anonymous loci, which is close to the theoretical maximum number of single copy, putatively neutral, and independently assorting loci in the human genome. Phylogenomic analyses of this dataset not only validated our algorithm by yielding a portrait of hominoid evolution consistent with previous studies, but the accuracy and precision of our estimated divergence times and ancestral effective population sizes are improved over previous studies. Complete genome *in silico* approaches such as ours will, combined with the burgeoning genome databases, accelerate the pace of phylogenomics research.

The era of using whole-genome data to reconstruct the evolutionary history of organismal clades has recently begun (*1,2*). Due to the increasing numbers of whole genome datasets that are publicly available, it is now becoming possible to target and extract hundreds or thousands of DNA sequence loci using computer-based methods for use in phylogenomic studies. Of the various types of evolutionary markers to choose from “anonymous loci” (*3*) are the preferred markers for use in coalescent-based phylogenomic studies because anonymous loci are thought to often meet three key assumptions of these analyses including: 1) each locus is single-copy in the genome, 2) each locus independently assorts relative to other loci in the sample, and 3) each locus is selectively neutral and not linked to genomic segments under selection (*4-6*). Studies that use large numbers of anonymous loci benefit because the gene trees inferred from such loci represent independent samples of the coalescent process (*7*) and therefore they can be used in statistically accurate and powerful analyses to estimate species trees, population divergence times, and ancestral population sizes (*8-10*). Recent NGS-based pipelines have greatly facilitated the process of developing novel anonymous loci (*11,12*), but the process of acquiring comparable sequences from other genomes is still time-consuming and technically challenging owing to lab-based procedures (*13*). Computer-based searches of existing genomic data represent the ideal methodology for finding and acquiring anonymous loci (*14-16*), but *in silico* approaches require complete genome sequence data, which are still unavailable for most species. However, the impending flood of complete genome sequences in coming years (*17*) will soon permit researchers to not only use *in silico* approaches to find large numbers of anonymous loci in non-model organisms, but also to extract comparable sequences from other genomes, perform multiple sequence alignments, and produce a single ready-to-analyze data file in mere minutes or hours instead of weeks or months.

We have developed a bioinformatics-based method that performs the serial tasks of anonymous loci data acquisition in a completely *in silico* fashion. Required input data files includes: complete genome sequence data in FASTA format for each individual or species and one GFF file containing the chromosomal coordinates for all known protein-coding genes, regulatory elements, RNAs, and other annotated genomic elements in the genome used as query. Both genome and GFF files are readily available in databases such as ENSEMBL. The algorithm’s first step is to map the intergenic sequences (i.e., anonymous regions) while discarding all sequences with known functions plus their genetically linked, flanking regions (fig. 1a). The length of the flanking regions should be long enough to decouple the anonymous DNA from protein-coding, regulatory, or other genomic elements with known functions because sites that are linked to functional regions can experience indirect selection and therefore may not satisfy the assumption of selective neutrality (*18,19*). The intergenic regions are of interest for anonymous loci development because, evidently, most vertebrate genomes contain vast amounts (> 90%) of apparently non-functional DNA (*20,21*) ,which is believed to be selectively neutral (*22*). To complete the first step, the anonymous regions are cut into consecutive segments (here we used 1Kb long fragments), which we termed “candidate anonymous loci” (fig. 1a). In the second step, the algorithm uses the candidate anonymous loci as query sequences to conduct a BLAST search *(23)* against other target genomes in order to find orthologous copies of each candidate anonymous locus. The program only retains the candidate anonymous loci present as a single copy in each sampled genome and saves all sequences in a FASTA file (fig. 1b). In the third step, the algorithm retrieves the FASTA sequences, conducts multiple sequence alignments for all candidate anonymous loci (*24*), and excludes anonymous loci that may be linked to one another (fig. 1c). Anonymous loci should be spaced far enough apart on a chromosome to be considered statistically uncorrelated from other anonymous loci. In humans, the minimum distance between unlinked sites located on the same chromosome can be assumed to be around 200 kb (*25*). After this selection step, the candidate anonymous loci are considered ideal anonymous loci because they are presumably single-copy, selectively neutral, and unlinked. The pipeline finishes by producing the following output files (in FASTA, NEXUS, and PHYLIP formats): one file containing the entire anonymous loci dataset with all multiple sequence alignments; one file containing all concatenated loci with the sequences aligned (i.e., “supermatrix”); and individual files corresponding to each anonymous locus multiple sequence alignment.

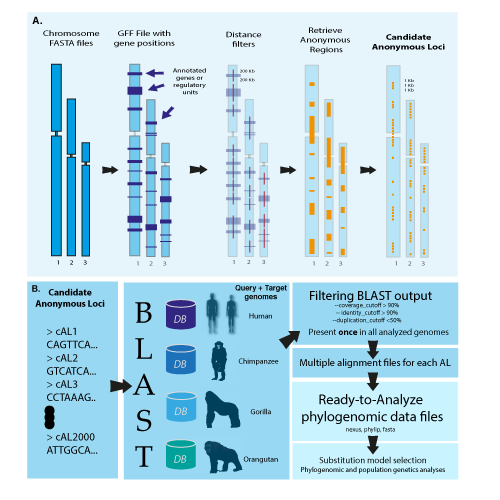


Figure 1.

We validated our anonymous loci acquisition algorithm using hominoid genome data. Not only are complete genome data available for each of the major hominoid lineages (i.e., human, chimpanzee, gorilla, and orangutan), but the evolutionary history of this group has been intensively studied and thus this system is ideal for evaluating the performance of our algorithm. Using the annotated human genome data, the anonymous loci algorithm required about 3 hours to generate a dataset consisting of 300 hominoid anonymous loci (table S1). As expected, the anonymous loci were scattered randomly across the human genome (fig. 2). Given the sizes of the hominoid genomes, this maximum number of anonymous loci might appear low. To estimate the theoretical maximum number of independently assorting loci that exist in the human genome, we conducted an analysis following (*26;* see Materials and Methods). If we assume that the effective population size of modern humans is between 7,500 (*27*) and 10,000 (*28*), then there are an estimated ~1000 to 1400 statistically uncorrelated loci in the human genome. If we were to exclude the loci that are not single-copy and which are either under direct natural selection or which are linked to sites in the genome under such selection, then the maximum number of single-copy and presumably neutral loci in the human genome is likely to be in the hundreds and not thousands. Our hypothesis is corroborated by the automated *in silico* based results herein and the manual *in silico* based study of (*15*).

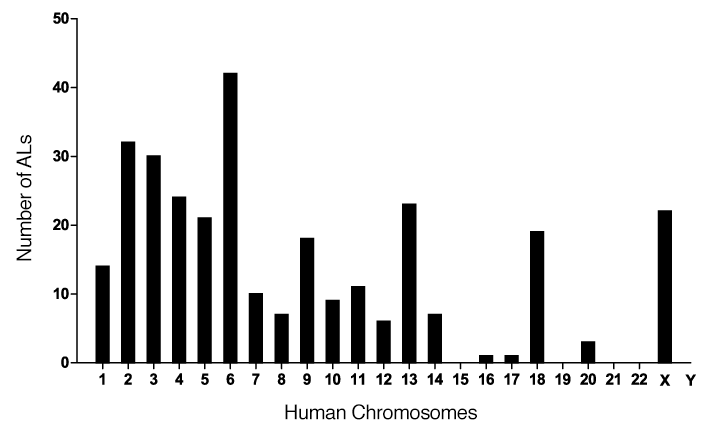


fig. 2. Histogram of AL distribution in human chromosomes.

Phylogenetic analyses of each anonymous locus generated a distribution of 300 rooted gene trees of which 64% (**193**/300) displayed the expected topology of a human-chimpanzee sister group relationship (table S2; *14,29*). These results constitute strong evidence based on the majority-rule criterion that we recovered the correct hominoid species tree (*30*). Moreover, our finding of the equally frequent alternative topologies (~20% each) also matches the expectations of coalescent theory (*7*,*30*) and previous empirical results (*14*).

Interestingly, despite 88 different DNA substitution models available in model testing procedure (see Materials and Methods), a single substitution model, the HKY85 model (*31*), best explains 70% (210/300) of our anonymous loci (fig. 3; table S3). It is not surprising that this model with its assumed unequal equilibrium base frequencies was so frequently chosen because the human genome is known to have a GC content of 41% (*22*). None of the models included the invariant sites or gamma parameters for among-site rate heterogeneity. Perhaps if the sites in our presumably neutral anonymous loci have been free of any functional constraints, then we would not expect to see significant among site rate variation. These results suggest that neutral intergenic sites may have a single mode of molecular evolution in the human genome that is characterized by simple transition-transversion rate differences (average ti/tv = 2.3±0.9; fig 4). If these results are confirmed in other comparable genomes, then we predict that phylogenomic results obtained from datasets consisting of hundreds or more anonymous loci will not substantially differ whether a single substitution model is used or each anonymous locus has its own specific model.

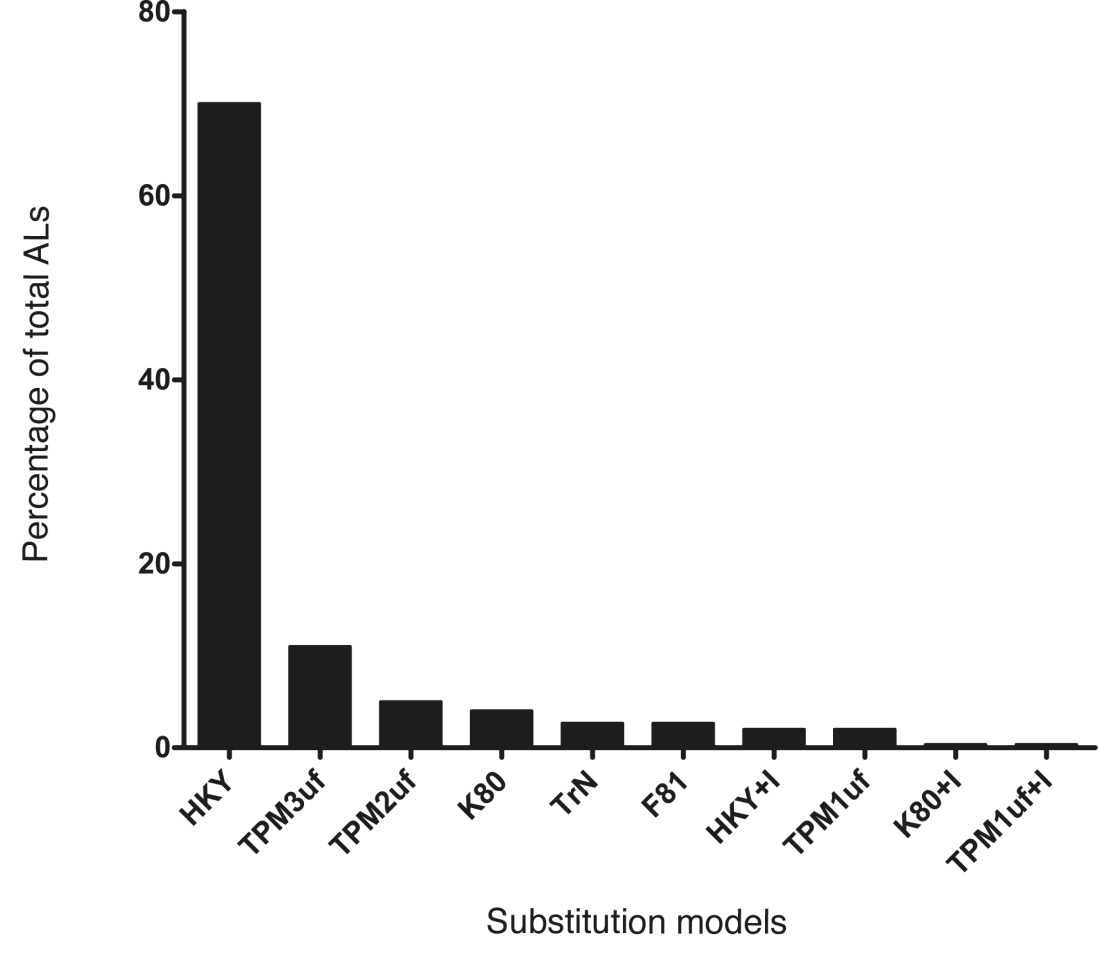


Figure 3.

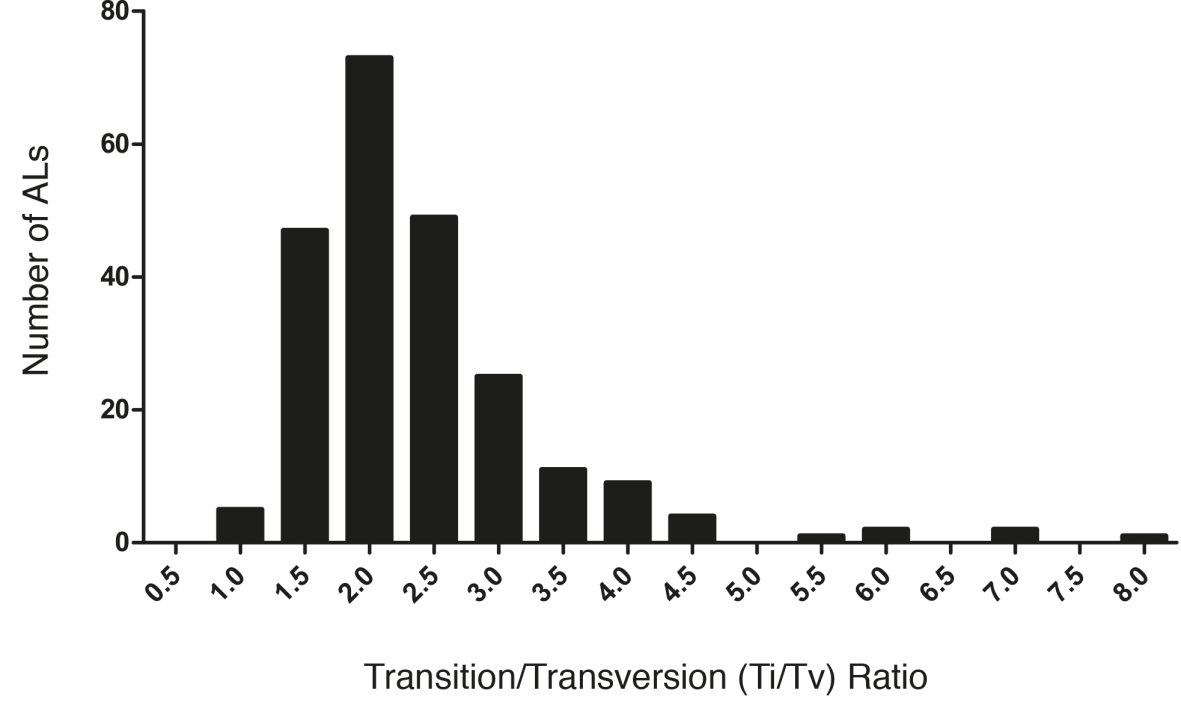


Figure 4.

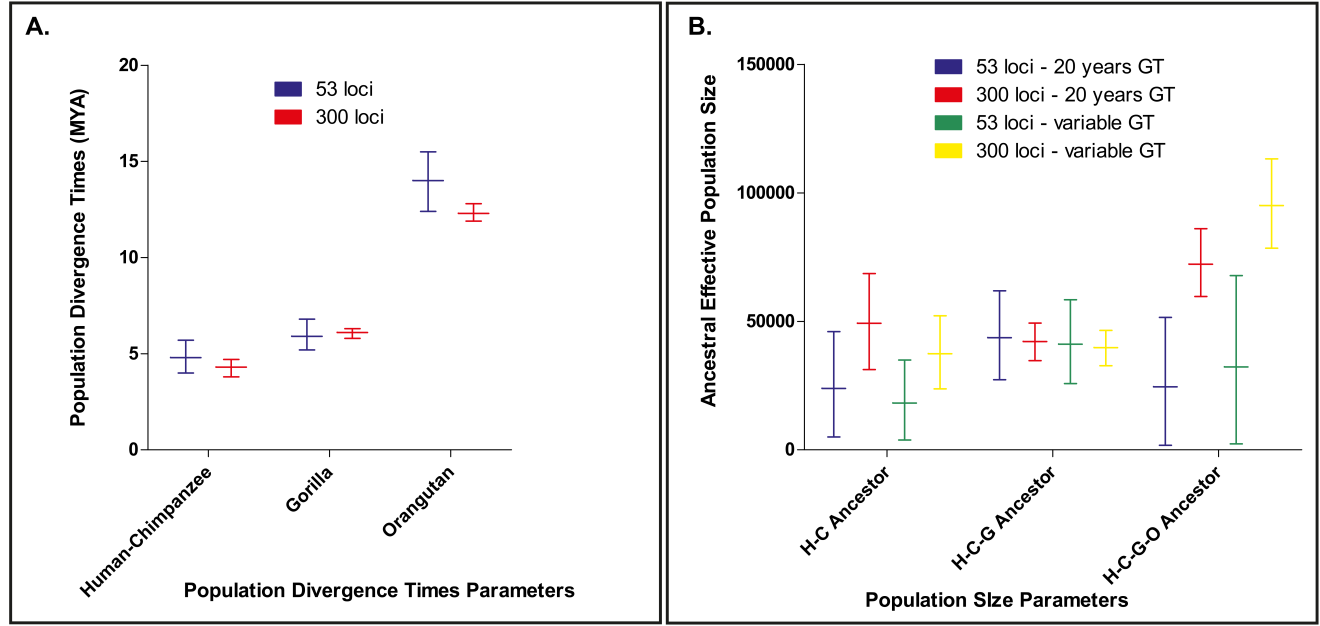


Figure 5.

Historical demographic parameter estimates between the 53 (*14*) and 300 (this work) locus datasets were largely in agreement thereby providing additional evidence that our algorithm performed as expected (fig. 4). The 300 locus-estimate places the human vs. chimpanzee and the orangutan divergences 0.5 and 1.8 million years (my) more recent, respectively, than the comparable estimates from the 53 locus-data (fig. 4a). All estimates for the gorilla divergence suggest this event took place about 6 my ago. The most dramatic, but not unexpected, results concern the width of the 95% Bayesian credibility intervals (C.I.). The 95% C.I. for the 300 locus-estimates were two-fold narrower for the human-chimpanzee divergence and three-fold smaller for the other two divergence time estimates (fig. 4a). The 300 locus-estimates for ancestral population size of the human and chimpanzee lineage ranged from 37,000-50,000 depending on the assumed generation time, while the 53 locus-estimates produced estimates of 17,000-23,000 (fig. 4b). Estimates for the ancestral population size for the human-chimpanzee-gorilla lineage were similar as they ranged between 40,000-43,000 (fig. 4b). The estimated ancestral population sizes for the hominoids considerably differed depending on dataset with the larger dataset producing estimates as high as 72,000-95,000 and the smaller dataset yielding much smaller values in the range of 21,000-33,000 (fig. 4b). The C.I.s for the human-chimpanzee ancestral population size were all quite large and did not vary according to numbers of loci, but the other two population size estimates showed two-fold reductions of their C.I.s in the estimates from the 300 locus data (fig. 4b). All parameter estimates were insensitive to choice of priors (fig. 4, fig. S2.).

A current projection (*17*) suggests that if the recent growth rate in the numbers of sequenced vertebrate genomes holds (10X/5 years), then we can expect at least 10,000 sequenced vertebrate genomes in 5-10 years. Bioinformatics algorithms like the one presented here will be needed to meet the challenge of this surge in available genomes. Comparative analyses of our 300 locus hominoid dataset vs. the 53 locus dataset of (*14*) generated concordant results thereby validating our algorithm. We also observed two- to three-fold reductions in the confidence intervals around our demographic parameter estimates compared to the 53 locus data of (*14*). This finding is significant because it provides the strongest evidence yet to corroborate previous theoretical-simulation (*8,10*) and empirical (*9,19*) studies concerning the inverse relationship between numbers of unlinked loci vs. the accuracy and precision of estimated historical demographic parameters. Such dramatic increases in the precision of divergence time estimates, in particular, may be critically important for testing biogeographic hypotheses. Owing to the quantity and quality of our chosen loci as well as methods of analysis, which also incorporated recent improved estimates for the ancestral generation times in the hominoids (*29*), the new estimates of population divergence times and ancestral population sizes presented here likely provide the most accurate and precise view of hominoid phylogenomic history to date.

**References and Notes**

1. Alföldi, J., Di Palma, F., Grabherr, M., Williams, C., Kong, L., Mauceli, E., ... & Lindblad-Toh, K. (2011). The genome of the green anole lizard and a comparative analysis with birds and mammals. *Nature*, *477*(7366), 587-591.

2. Jarvis, E. D., Mirarab, S., Aberer, A. J., Li, B., Houde, P., Li, C., ... & Samaniego, J. A.

(2014). Whole-genome analyses resolve early branches in the tree of life of modern birds. *Science*, *346*(6215), 1320-1331.

3. Karl, S. A., & Avise, J. C. (1993). PCR-based assays of mendelian polymorphisms

from anonymous single-copy nuclear DNA: techniques and applications for population genetics. *Molecular Biology and Evolution*, *10*(2), 342-361.

4. Brito, P. H., & Edwards, S. V. (2009). Multilocus phylogeography and phylogenetics

using sequence-based markers. *Genetica*, *135*(3), 439-455.

5. Thomson, R.C., Wang, I.J., Johnson, J.R. (2010). Genome-enabled development of DNA markers for ecology, evolution, and conservation. *Molecular Ecology*

19:2184–2195.

6. Reilly, S. B., Marks, S. B., & Jennings, W. B. (2012). Defining evolutionary

boundaries across parapatric ecomorphs of Black Salamanders (*Aneides flavipunctatus*) with conservation implications. *Molecular ecology*, *21*(23), 5745-5761.

7. Wakeley, J. (2009). *Coalescent theory: an introduction* (Vol. 1). Greenwood Village, Colorado: Roberts & Company Publishers.

8. Pluzhnikov, A., & Donnelly, P. (1996). Optimal sequencing strategies for surveying molecular genetic diversity. *Genetics*, *144*(3), 1247-1262.

9. Jennings, W.B., Edwards, S.V. (2005). Speciational history of Australian Grass Finches (*Poephila*) inferred from thirty gene trees. *Evolution* 59:2033–2047.

10. Felsenstein, J. (2006). Accuracy of coalescent likelihood estimates: do we need

more sites, more sequences, or more loci?. *Molecular biology and evolution*, *23*(3), 691-700.

11. Bertozzi, T., Sanders, K.L., Sistrom, M.J., Gardner, M.G. 2012. Anonymous nuclear

loci in non-model organisms: making the most of high throughput genome

surveys. *Bioinformatics*.

12. Lemmon, A.R., & Lemmon, E.M. (2012). High-throughput identification of informative nuclear loci for shallow-scale phylogenetics and phylogeography. *Systematic Biology*.

13. Lemmon, E. M., & Lemmon, A. R. (2013). High-throughput genomic data in systematics and phylogenetics. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, *44*, 99-121.

14. Chen, F. C., & Li, W. H. (2001). Genomic divergences between humans and other

hominoids and the effective population size of the common ancestor of humans and chimpanzees. *The American Journal of Human Genetics*, *68*(2), 444-456.

15. Peng, Z., Elango, N., Wildman, D. E., & Soojin, V. Y. (2009). Primate

phylogenomics: developing numerous nuclear non-coding, non-repetitive markers for ecological and phylogenetic applications and analysis of evolutionary rate variation. *BMC genomics*, *10*(1), 247.

16. Wenzel, M. A., & Piertney, S. B. (2015) In silico identification and characterisation

of 17 polymorphic anonymous non-coding sequence markers (ANMs) for red grouse (*Lagopus lagopus scotica*). *Conservation Genetics Resources*, 1-5.

17. O’Brien, S. J., Haussler, D., & Ryder, O. (2014). The birds of Genome10K. *GigaScience*, *3*(1), 32.

18. Kaplan, N. L., Hudson, R. R., & Langley, C. H. (1989). The "hitchhiking effect" revisited. *Genetics*, *123*(4), 887-899.

19. Lee, J.Y., Edwards, S.V. (2008). Divergence across Australia’s Carpentarian barrier:

statistical phylogeography of the red-backed fairy wren *Malurus melanocephalus*. *Evolution* 62:3117–3134.

20. Meader, S., Ponting, C.P., Lunter, G. (2010). Massive turnover of functional

sequence in human and other mammalian genomes. *Genome Research* 20:1335 1343.

21. Ponting, C.P., Hardison, R.C. (2011). What fraction of the human genome is

functional? *Genome Research* 21:1769–1776.

22. Graur, D., Zheng, Y., & Azevedo, R. B. (2015). An evolutionary classification of genomic function. *Genome biology and evolution*, *7*(3), 642-645.

23. Camacho C., Coulouris G., Avagyan V., Ma N., Papadopoulos J., Bealer K., & Madden T.L. (2008). BLAST+: architecture and applications. *BMC Bioinformatics*, 10:421.

24. Larkin, M. A., Blackshields, G., Brown, N. P., Chenna, R., McGettigan, P. A., McWilliam, H., Valentin, F., Wallace, I. M., Wilm, A., Lopez, R., Thompson, J. D., Gibson, T. J., & Higgins, D. G. (2007) Clustal W and Clustal X version 2.0. *Bioinformatics*, 23 (21), 2947-2948

25. Sachidanandam, R., Weissman, D., Schmidt, S. C., Kakol, J. M., Stein, L. D., Marth, G.,... & Altshuler, D. (2001). A map of human genome sequence variation containing 1.42 million single nucleotide polymorphisms. *Nature*, *409*(6822), 928-933.

26. Hudson, R. R., & Coyne, J. A. (2002). Mathematical consequences of the

genealogical species concept. *Evolution*, *56*(8), 1557-1565.

27. Tenesa, A., Navarro, P., Hayes, B. J., Duffy, D. L., Clarke, G. M., Goddard, M. E., &

Visscher, P. M. (2007). Recent human effective population size estimated from linkage disequilibrium. *Genome research*, *17*(4), 520-526.

28. Takahata, N. (1993). Allelic genealogy and human evolution. *Molecular Biology and*

*Evolution*, *10*(1), 2-22.

29. Schrago, C. G. (2014). The effective population sizes of the anthropoid ancestors of the human–chimpanzee lineage provide insights on the historical biogeography of the great apes. *Molecular biology and evolution*, *31*(1), 37-47.

30. Degnan, J. H., & Rosenberg, N. A. (2009). Gene tree discordance, phylogenetic inference and the multispecies coalescent. *Trends in ecology & evolution*, *24*(6), 332-340.

31. Hasegawa, M., Kishino, H., & Yano, T. A. (1985). Dating of the human-ape splitting by a molecular clock of mitochondrial DNA. *Journal of molecular evolution*, *22*(2), 160-174.

32. Cock, P. J., Antao, T., Chang, J. T., Chapman, B. A., Cox, C. J., Dalke, A., Friedberg, I., Hamelryck, T., Kauff, F., Wilczynski, B., & de Hoon, M. J. (2009). Biopython: freely available Python tools for computational molecular biology and bioinformatics. *Bioinformatics*, 25(11), 1422-1423.

**List of Figures**

fig. 1. Schematic of AL acquisition and assembly algorithm

fig. 2. Histogram of AL distribution in human chromosomes

fig. 3. Modeltest results

fig. 4. Histogram of Ti/Tv distribution

fig. 5. Estimated historical demographic parameters for hominoids.

**Supplemental Figure**

fig. s1. Shows histogram of ti/tv ratios from the 300 models tested.

fig. s2. Shows the estimated historical demographic parameters for hominoids using the exponential priors.

**Supplemental Tables**

table S1. Shows all 300 ALs, bp, chromosome#, locations inferred rooted topology in Newick form or ((H,C),G) and the Modeltest chosen model and parameter estimates

table S2. Shows results for historical demographic parameters

**Materials and Methods**

Our software was named alfie package and is available at https://[github.com/igorrcosta/alfie](http://www.github.com/igorrcosta/alfie). It was developed in Python 2.7 using the Biopython library (*32*). Alfie is a package containing several Python scripts that work together to predict anonymous loci in complete genomes. The alfie.py script encapsulates all functions in an easy to use command line interface. Although there are many options and configurations available for the advanced user, the program only requires 2 or more genome files and a file with gene annotations. A standard run will follow these steps:

1. Find regions in the reference genome that are far from functional regions;
2. Split those regions into candidate anonymous loci;
3. Filter loci that are not single-copy in all genomes;
4. Align the loci from all genomes.

The search in step 3 and the alignment in step 4 use the BLAST+ (*23*) and the CLUSTALW (*24*) programs respectively. Additionally, the package includes scripts for phylogenetic analysis, substitution model prediction, loci chromosomal distribution and PCR primer design. A complete manual explaining the program usage is available at https://[github.com/igorrcosta/alfie](http://www.github.com/igorrcosta/alfie)/manual.pdf.

Referências

1. Kuska, B., *Beer, Bethesda, and biology: how "genomics" came into being.* J Natl Cancer Inst, 1998. **90**(2): p. 93.

2. *Genome 10K: a proposal to obtain whole-genome sequence for 10,000 vertebrate species.* J Hered, 2009. **100**(6): p. 659-74.

3. Schuster, S.C., *Next-generation sequencing transforms today's biology.* Nat Methods, 2008. **5**(1): p. 16-8.

4. Mardis, E.R., *A decade's perspective on DNA sequencing technology.* Nature, 2011. **470**(7333): p. 198-203.

5. Koboldt, D.C., et al., *Challenges of sequencing human genomes.* Brief Bioinform, 2010. **11**(5): p. 484-98.

6. Brown, G.R., et al., *Gene: a gene-centered information resource at NCBI.* Nucleic Acids Res, 2015. **43**(Database issue): p. D36-42.

7. Federhen, S., *The NCBI Taxonomy database.* Nucleic Acids Res, 2012. **40**(Database issue): p. D136-43.

8. Pruitt, K.D., et al., *NCBI Reference Sequences (RefSeq): current status, new features and genome annotation policy.* Nucleic Acids Res, 2012. **40**(Database issue): p. D130-5.

9. Flicek, P., et al., *Ensembl 2014.* Nucleic Acids Res, 2014. **42**(Database issue): p. D749-55.

10. Takahata, N., Y. Satta, and J. Klein, *Divergence time and population size in the lineage leading to modern humans.* Theor Popul Biol, 1995. **48**(2): p. 198-221.

11. Ruvolo, M., *Molecular phylogeny of the hominoids: inferences from multiple independent DNA sequence data sets.* Mol Biol Evol, 1997. **14**(3): p. 248-65.

12. Chen, F.C. and W.H. Li, *Genomic divergences between humans and other hominoids and the effective population size of the common ancestor of humans and chimpanzees.* Am J Hum Genet, 2001. **68**(2): p. 444-56.

13. Horai, S., et al., *Man's place in Hominoidea revealed by mitochondrial DNA genealogy.* J Mol Evol, 1992. **35**(1): p. 32-43.

14. Bailey, W.J., et al., *Molecular evolution of the psi eta-globin gene locus: gibbon phylogeny and the hominoid slowdown.* Mol Biol Evol, 1991. **8**(2): p. 155-84.

15. Takahata, N., *A simple genealogical structure of strongly balanced allelic lines and trans-species evolution of polymorphism.* Proc Natl Acad Sci U S A, 1990. **87**(7): p. 2419-23.

16. Rogers, A.R. and H. Harpending, *Population growth makes waves in the distribution of pairwise genetic differences.* Mol Biol Evol, 1992. **9**(3): p. 552-69.

17. Jeffreys, A.J., V. Wilson, and S.L. Thein, *Hypervariable 'minisatellite' regions in human DNA.* Nature, 1985. **314**(6006): p. 67-73.

18. Ahmadian, A., et al., *Single-nucleotide polymorphism analysis by pyrosequencing.* Anal Biochem, 2000. **280**(1): p. 103-10.

19. Rands, C.M., et al., *8.2% of the Human genome is constrained: variation in rates of turnover across functional element classes in the human lineage.* PLoS Genet, 2014. **10**(7): p. e1004525.

20. Jennings, W.B. and S.V. Edwards, *Speciational history of Australian grass finches (Poephila) inferred from thirty gene trees.* Evolution, 2005. **59**(9): p. 2033-47.

21. Lee, J.Y. and S.V. Edwards, *Divergence across Australia's Carpentarian barrier: statistical phylogeography of the red-backed fairy wren (Malurus melanocephalus).* Evolution, 2008. **62**(12): p. 3117-34.

22. Gottscho, A.D., S.B. Marks, and W.B. Jennings, *Speciation, population structure, and demographic history of the Mojave Fringe-toed Lizard (Uma scoparia), a species of conservation concern.* Ecol Evol, 2014. **4**(12): p. 2546-62.

23. Jarne, P. and P.J. Lagoda, *Microsatellites, from molecules to populations and back.* Trends Ecol Evol, 1996. **11**(10): p. 424-9.

24. Bertozzi, T., et al., *Anonymous nuclear loci in non-model organisms: making the most of high-throughput genome surveys.* Bioinformatics, 2012. **28**(14): p. 1807-10.

25. Cock, P.J., et al., *Biopython: freely available Python tools for computational molecular biology and bioinformatics.* Bioinformatics, 2009. **25**(11): p. 1422-3.

26. Camacho, C., et al., *BLAST+: architecture and applications.* BMC Bioinformatics, 2009. **10**: p. 421.

27. Guindon, S. and O. Gascuel, *A simple, fast, and accurate algorithm to estimate large phylogenies by maximum likelihood.* Syst Biol, 2003. **52**(5): p. 696-704.

28. Thompson, J.D., T.J. Gibson, and D.G. Higgins, *Multiple sequence alignment using ClustalW and ClustalX.* Curr Protoc Bioinformatics, 2002. **Chapter 2**: p. Unit 2 3.

29. Posada, D. and K.A. Crandall, *MODELTEST: testing the model of DNA substitution.* Bioinformatics, 1998. **14**(9): p. 817-8.

30. Posada, D., *jModelTest: phylogenetic model averaging.* Mol Biol Evol, 2008. **25**(7): p. 1253-6.

31. Hasegawa, M., H. Kishino, and T. Yano, *Dating of the human-ape splitting by a molecular clock of mitochondrial DNA.* J Mol Evol, 1985. **22**(2): p. 160-74.

32. Degnan, J.H. and N.A. Rosenberg, *Gene tree discordance, phylogenetic inference and the multispecies coalescent.* Trends Ecol Evol, 2009. **24**(6): p. 332-40.

33. Rannala, B. and Z. Yang, *Bayes estimation of species divergence times and ancestral population sizes using DNA sequences from multiple loci.* Genetics, 2003. **164**(4): p. 1645-56.

34. Yang, Z. and B. Rannala, *Bayesian species delimitation using multilocus sequence data.* Proc Natl Acad Sci U S A, 2010. **107**(20): p. 9264-9.

35. Hobolth, A., et al., *Genomic relationships and speciation times of human, chimpanzee, and gorilla inferred from a coalescent hidden Markov model.* PLoS Genet, 2007. **3**(2): p. e7.