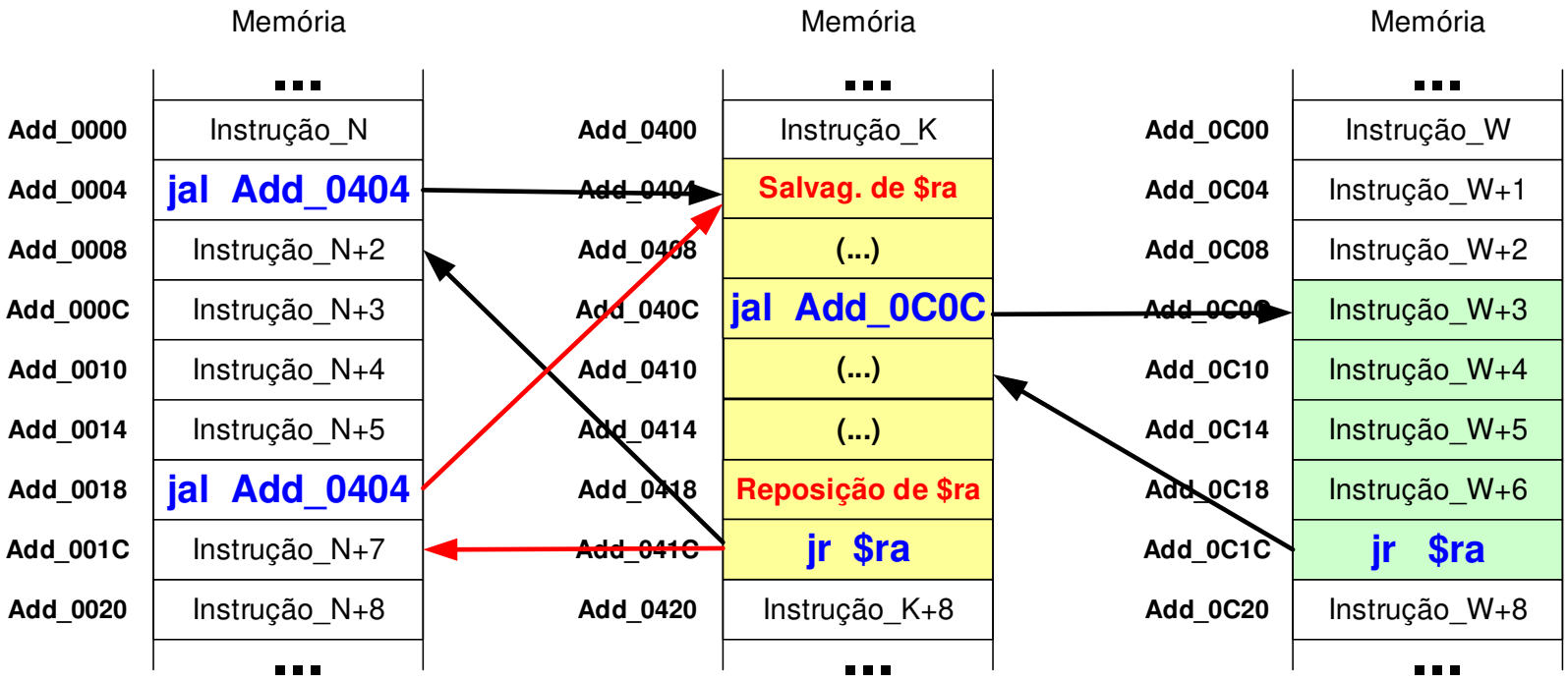
Aula 8

- Utilização de *stacks*
- Conceito e regras básicas de utilização
- Utilização da *stack* nas arquiteturas MIPS
- Recursividade
- Análise de um exemplo, incluindo uma sub-rotina recursiva

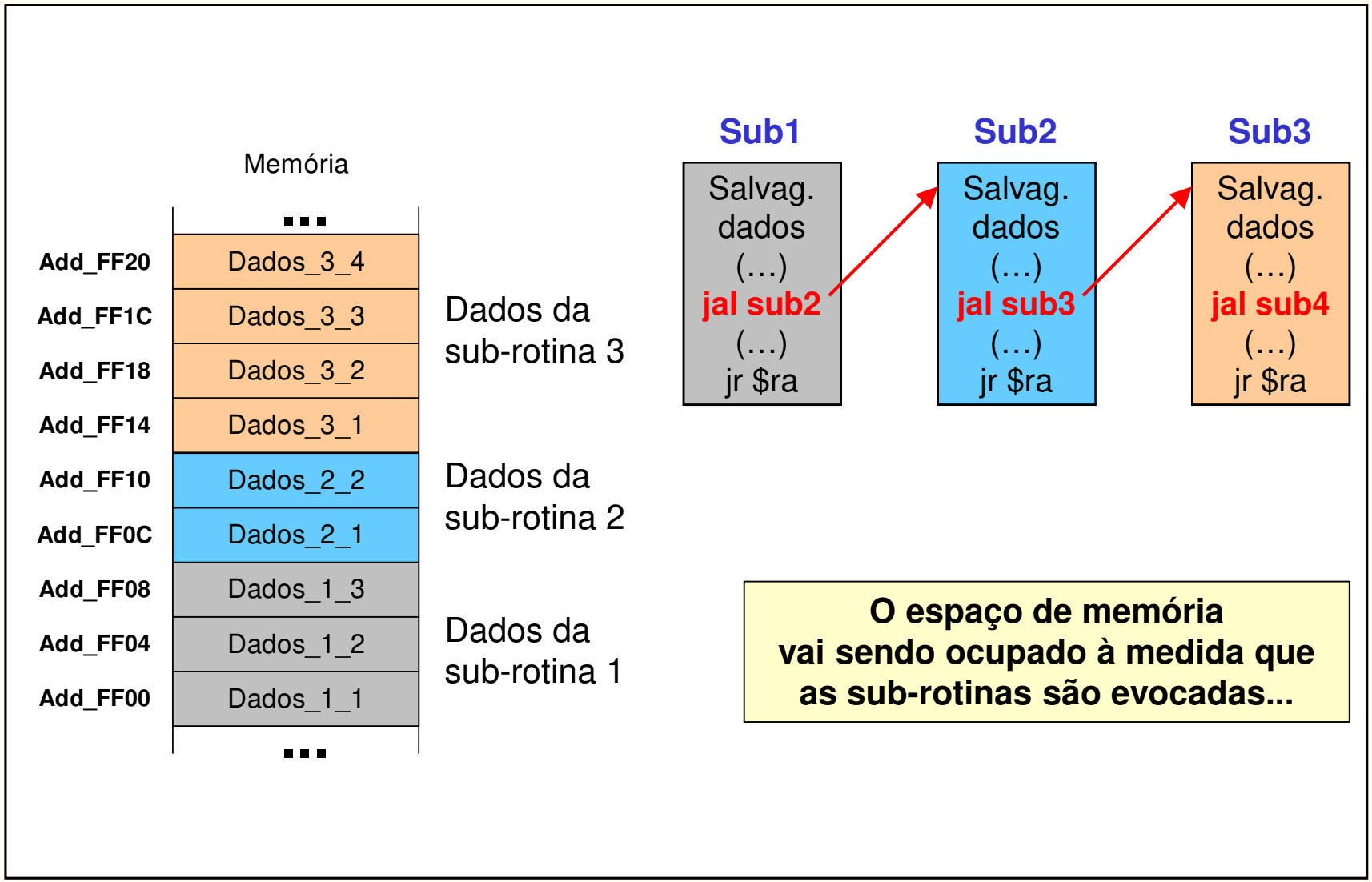
José Luís Azevedo, Bernardo Cunha, Arnaldo Oliveira, Pedro Lavrador

Armazenamento temporário de informação

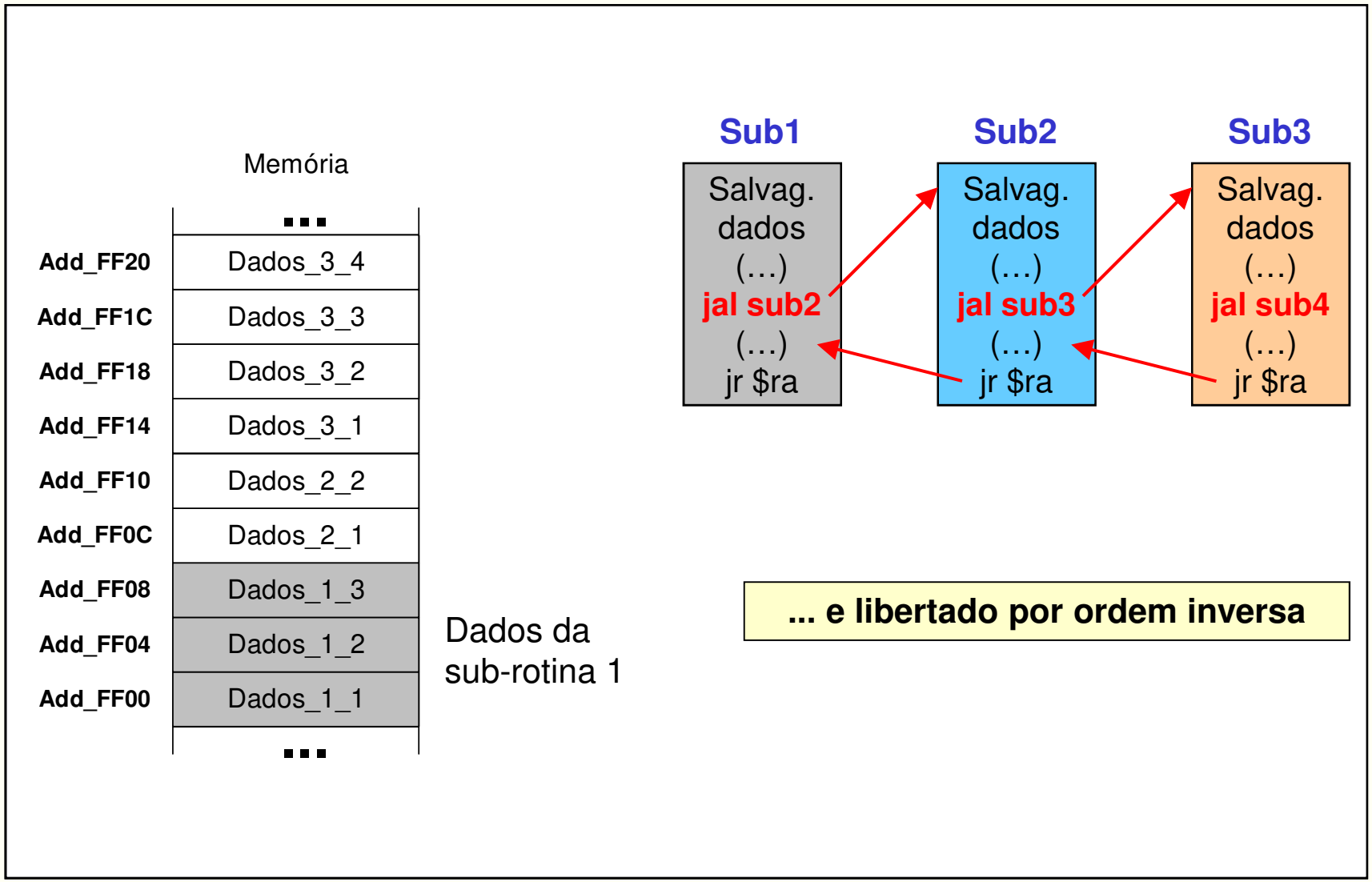
Como poderemos garantir que os dados, residentes em memória e manipulados por cada sub-rotina não interferem com os dados das restantes?



Stack: espaço de armazenamento temporário



Stack: espaço de armazenamento temporário

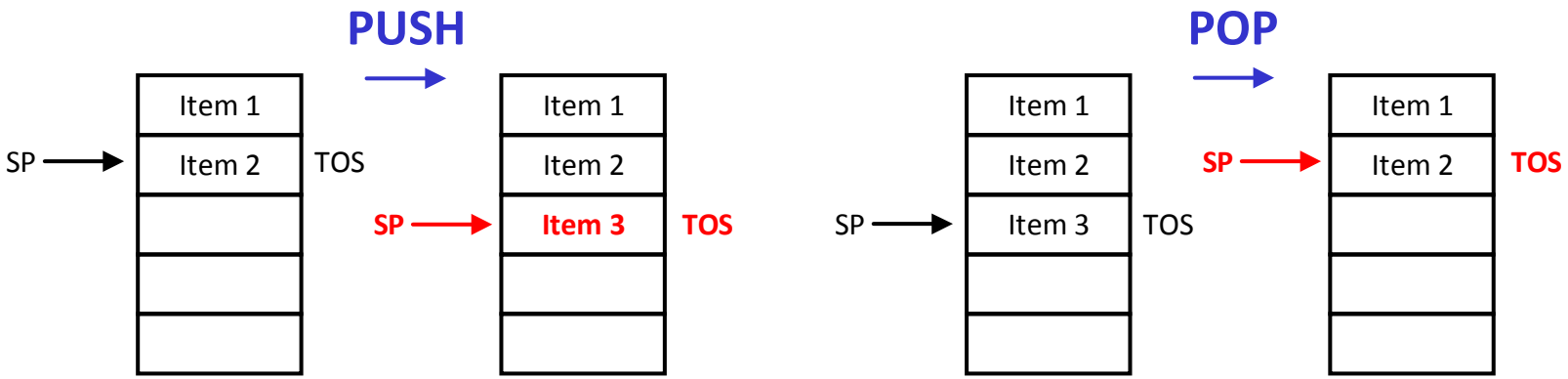


Stack: espaço de armazenamento temporário

- A estratégia de gestão dinâmica do espaço de memória - em que a última informação acrescentada é a primeira a ser retirada – é designada por **LIFO** (*Last In First Out*)
- A estrutura de dados correspondente é conhecida por “pilha” - ***STACK***
- As *stacks* são de tal forma importantes que a maioria das arquiteturas suportam diretamente instruções específicas para manipulação de *stacks* (por exemplo a x86)
- A operação que permite acrescentar informação à *stack* é normalmente designada por **PUSH**, enquanto que a operação inversa é conhecida por **POP**

Stack: operações *push* e *pop*

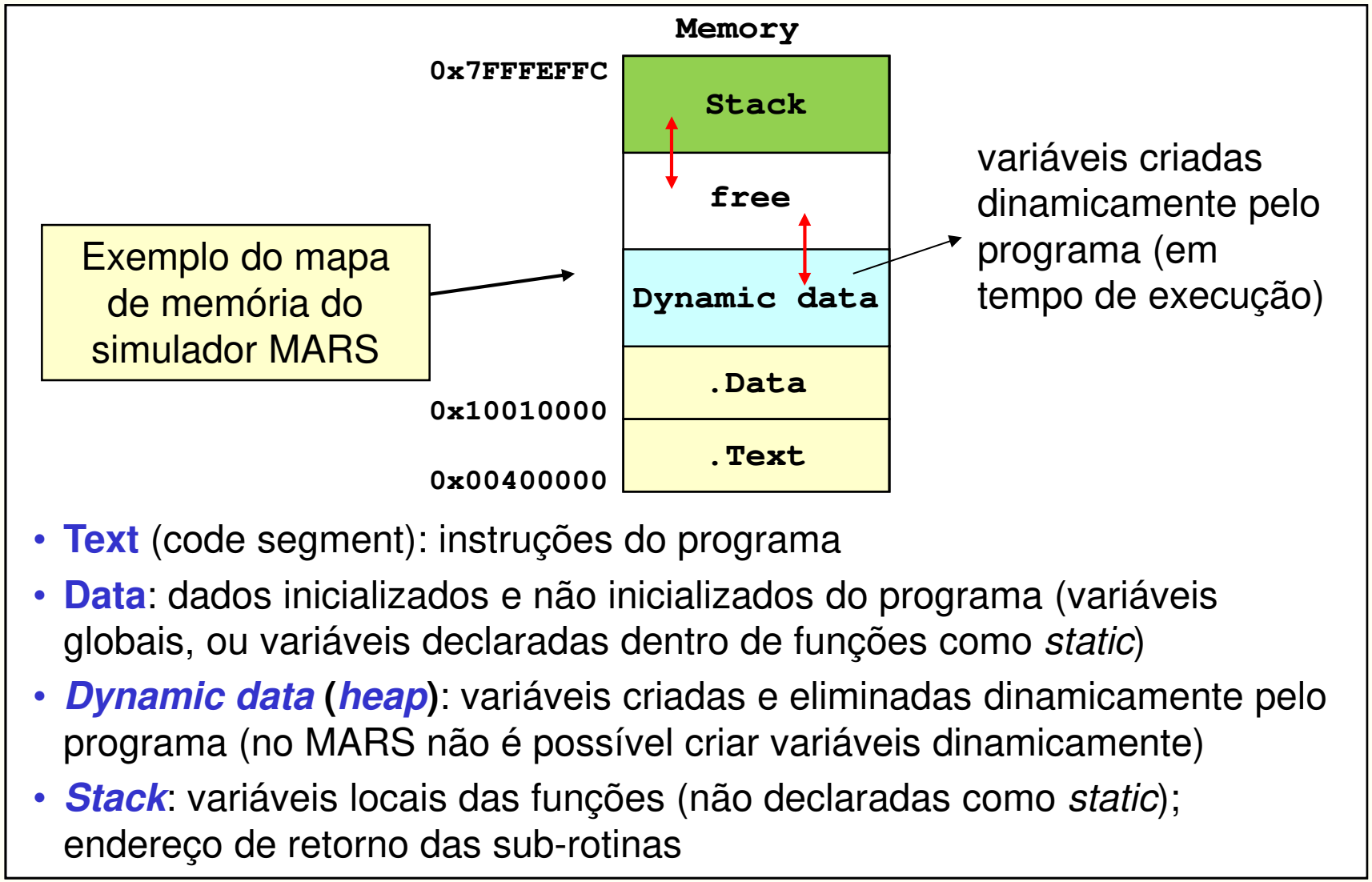
- Estas operações têm associado um registo designado por ***Stack Pointer*** **(SP)**
- O registo ***Stack Pointer*** mantém, de forma permanente, **o endereço do topo da *stack*** (**TOS** - *top of stack*) e aponta sempre **para o último endereço ocupado**
  - Numa operação de **PUSH** é necessário pré-atualizar o *stack pointer* antes de uma nova operação de escrita na *stack*
  - Numa operação de **POP** é feita uma leitura da *stack* seguida de atualização do *stack pointer*



Atualização do *stack pointer*

- A atualização do ***stack pointer***, durante a fase de escrita de informação, pode seguir uma de duas estratégias:
  - Ser incrementado, fazendo crescer a *stack* no sentido crescente dos endereços
  - Ser decrementado, fazendo crescer a *stack* no sentido decrescente dos endereços
- A estratégia de crescimento da *stack* no sentido dos endereços mais baixos é, geralmente, a adotada
- A estratégia de crescimento da *stack* no sentido dos endereços mais baixos permite uma gestão simplificada da fronteira entre os segmentos de dados e de *stack*

Atualização do *stack pointer*



- **Text** (code segment): instruções do programa
- **Data**: dados inicializados e não inicializados do programa (variáveis globais, ou variáveis declaradas dentro de funções como *static*)
- ***Dynamic data*** **(*heap*)**: variáveis criadas e eliminadas dinamicamente pelo programa (no MARS não é possível criar variáveis dinamicamente)
- ***Stack***: variáveis locais das funções (não declaradas como *static*); endereço de retorno das sub-rotinas

Regras de utilização da *stack* na arquitetura MIPS

1. O registo **$sp** (*stack pointer*) contém o endereço da **última posição ocupada** da *stack*

2. A *stack* **cresce** no **sentido decrescente** dos endereços da memória

$sp = $29

Regras de utilização da *stack* na arquitetura MIPS

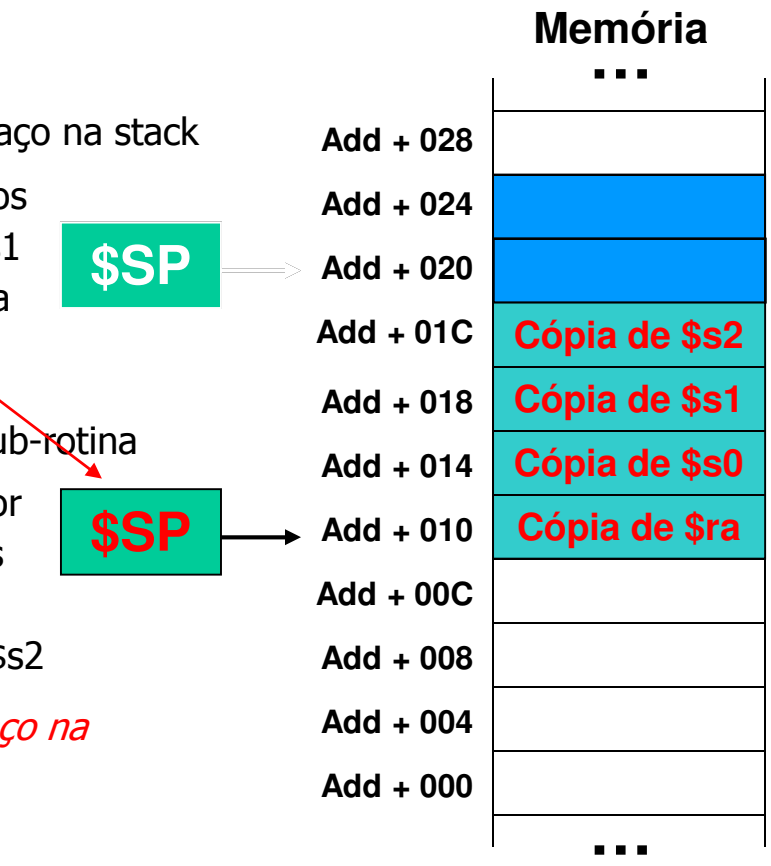
- Exemplo

```
lab:  subu  $sp,  $sp,  16   # Reserva espaço na stack
      sw    $ra,  0($sp)     # Copia registos
      sw    $s0,  4($sp)     #  $ra, $s0, $s1
      sw    $s1,  8($sp)     #  e $s2 para a
      sw    $s2,  12($sp)    #  stack

        (...)                # Código da sub-rotina

      lw    $ra,  0($sp)     # Repõe o valor
      lw    $s0,  4($sp)     #  dos registos
      lw    $s1,  8($sp)     #  $ra,
      lw    $s2,  12($sp)    #  $s0, $s1 e $s2

      addu  $sp,  $sp,  16   # Liberta espaço na
                             # stack
```



Regras de utilização da *stack* na arquitetura MIPS

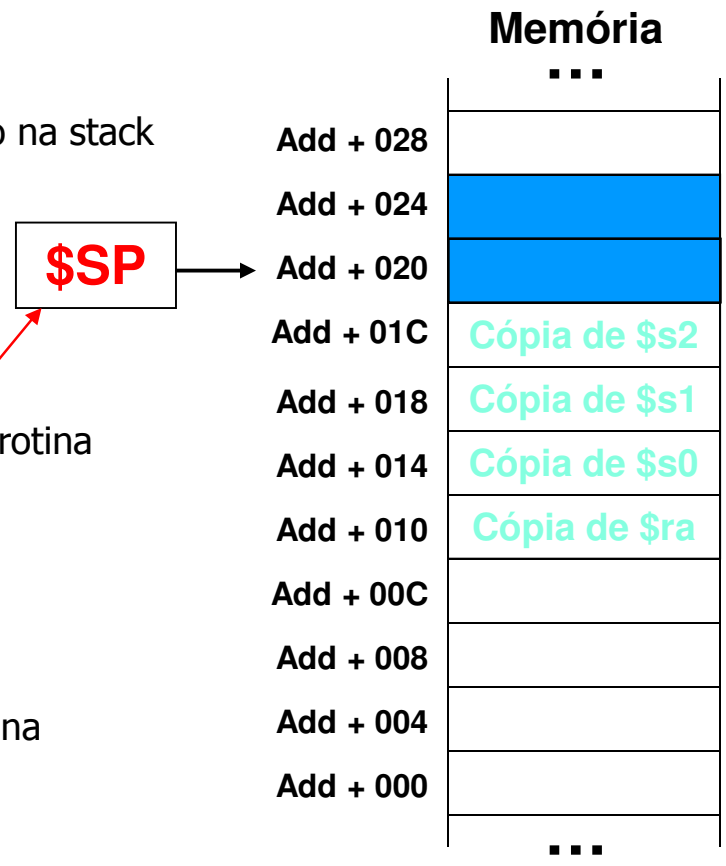
- Exemplo

```
lab:  subu  $sp,  $sp,  16   # Reserva espaço na stack
      sw    $ra,  0($sp)     # Copia registos
      sw    $s0,  4($sp)     #  $ra, $s0, $s1
      sw    $s1,  8($sp)     #  e $s2 para a
      sw    $s2,  12($sp)    #  stack

         (...)               # Código da sub-rotina

      lw    $ra,  0($sp)     # Repõe o valor
      lw    $s0,  4($sp)     #  dos registos
      lw    $s1,  8($sp)     #  $ra,
      lw    $s2,  12($sp)    #  $s0, $s1 e $s2

      addu  $sp,  $sp,  16   # Liberta espaço na
                             # stack
```



Análise de um exemplo completo

Considere-se o seguinte código C:

```
int soma(int *, int);

void main(void)
{
    static int array[100];//reside em memória
    int result;
    ...              // código de inicialização do array
    result = soma(array, 100);
    print_int10(result); // syscall
}
```

Declaração de um *array static* (reside no "data segment")

Declaração de uma variável inteira (pode residir num registo interno)

Afixação do resultado no ecrã

Evocação de uma função e atribuição do valor devolvido à variável inteira

Código correspondente em *Assembly* do MIPS

```
void main(void) {
    static int array[100];
    int result;
    result = soma(array, 100);
    print_int(result);
}
```

```
# $t0 > variável "result"
#
        .data
array:  .space 400              # Reserva de espaço p/ o array
                                # (100 words => 400 bytes)
        .eqv    print_int, 1    #
        .text                   Text
        .globl  main
main:   subu    $sp, $sp, 4     # Reserva espaço na stack
        sw      $ra, 0($sp)     # Salvaguarda o registo $ra
        la      $a0, array      # inicialização dos registos
        li      $a1, 100        #  que vão passar os parâmetros
        jal     soma            # soma(array, 100)
        move    $t0, $v0        # result = soma(array, 100)
        move    $a0, $t0        #
        li      $v0, print_int
        syscall                 # print_int(result)
        lw      $ra, 0($sp)     # Recupera o valor do reg. $ra
        addu    $sp, $sp, 4     # Liberta espaço na stack
        jr      $ra             # Retorno
```

Código da função soma()

```
int  soma (int *array, int nelem)
{
     int n, res;
     for (n = 0, res = 0; n < nelem; n++)
     {
          res = res + array[n];
     }
     return res;
}
```

Esta função recebe dois parâmetros (um ponteiro para inteiro e um inteiro) e calcula o seguinte resultado:

$$res = \sum_{n=0}^{nelem-1} (array[n])$$

A mesma função usando ponteiros:

```
int  soma (int *array, int nelem)
{
     int res = 0;
     int *p = array;
     for (; p < &(array[nelem]); p++) // ou: ; p < (array + nelem);
     {
          res += (*p);
     }
     return res;
}
```

Código correspondente em *Assembly* do MIPS

- Versão com ponteiros

```
int  soma (int *array, int nelem)
{
     int res = 0;
     int *p = array;
     for (; p < &(array[nelem]); p++)
          res += (*p);
     return res;
}
```

```
# $t1 > p
# $v0 > res
#
soma:   li      $v0, 0          # res = 0;
        move    $t1, $a0        # p = array;
        sll     $a1, $a1, 2     # nelem *= 4;
        addu    $a0, $a0, $a1   # $a0 = array + nelem;
for:    bgeu    $t1, $a0, endf  # while(p < &(array[nelem]){
        lw      $t2, 0($t1)     #
        add     $v0, $v0, $t2   #      res = res + (*p);
        addiu   $t1, $t1, 4     #      p++;
        j       for             # }
endf:   jr      $ra             # return res;
```

A sub-rotina não evoca nenhuma outra e não são usados registos $S*n*, pelo que não é necessário salvaguardar qualquer registo

Exemplo – função para cálculo da média

```
int media (int *array, int nelem)
{
    int res;
    res = soma(array, nelem);
    return res / nelem;
}
```

chama função soma()

Valor de ***nelem*** é necessário depois de chamada a função "soma"!

```
# res > $t0, array > $a0, nelem > $a1
media:  subu  $sp,$sp,8     # Reserva espaço na stack
        sw    $ra,0($sp)    # salvaguarda $ra
        sw    $s0,4($sp)    # guarda valor $s0 antes de o usar
        move  $s0,$a1       # nelem é necessário depois
                            # da chamada à função soma
        jal   soma          # soma(array,nelem);
        move  $t0,$v0       # res = retorno de soma()
        div   $v0,$t0,$s0   # res/nelem
        lw    $ra,0($sp)    # recupera valor de $ra
        lw    $s0,4($sp)    # e $s0
        addu  $sp,$sp,8     # Liberta espaço na stack
        jr    $ra           # retorna
```

nos nao mandamos o a0 e o a1 porqiuequue eles ja estao guardados como argumento quando chamamos a funcao media()

Recursividade – função soma()

$$res = \sum_{n=0}^{nelem-1} (array[n])$$

O resultado do somatório pode também ser obtido da seguinte forma:

$$res = array[0] + \underbrace{\sum_{n=1}^{nelem-1} (array[n])}$$

$$array[1] + \underbrace{\sum_{n=2}^{nelem-1} (array[n])}$$

$$array[2] + \sum_{n=3}^{nelem-1} (array[n])$$

(...)

$$\underbrace{array[nelem - 1]}$$

$$\sum_{n=i}^{nelem-1} (array[n]) = array[i] + \sum_{n=i+1}^{nelem-1} (array[n])$$

Recursividade – função soma()

$$res = \sum_{n=0}^{nelem-1} (array[n])$$

res = soma (array, 0, nelem);

$$array[0] + \sum_{n=1}^{nelem-1} (array[n])$$

array[0] + soma (array, 1, nelem);

$$array[1] + \sum_{n=2}^{nelem-1} (array[n])$$

array[1] + soma (array, 2, nelem);

$$\sum_{n=i}^{nelem-1} (array[n]) = array[i] + \sum_{n=i+1}^{nelem-1} (array[n])$$

```
int soma(int *array, int i, int nelem);
```

```
int soma(int *array, int i, int nelem)
{
    return array[i] + soma(array, i+1, nelem);
}
```

O que falta nesta função?

Recursividade – função soma()

$$\sum_{n=i}^{nelem-1}(array[n]) = array[i] + \sum_{n=i+1}^{nelem-1}(array[n])$$

A função **soma()** pode, assim, ser escrita de forma **recursiva**:

O valor devolvido é posteriormente adicionado com o valor armazenado na posição **i** do *array*

```
int soma_rec (int *array, int i, int nelem)
{
    if (i != nelem)
        return array[i] + soma_rec (array, i + 1, nelem);
    else
        return 0;
}
```

se nao pararmos ela vai crescer a stack até que a stack passe para a zona de memoria estatica e possa reescrever na array

A função evoca-se a si mesma, passando como primeiro parâmetro o endereço do início do *array*, como segundo parâmetro o índice a partir do qual se pretende obter a soma e como terceiro parâmetro o número de elementos do *array*

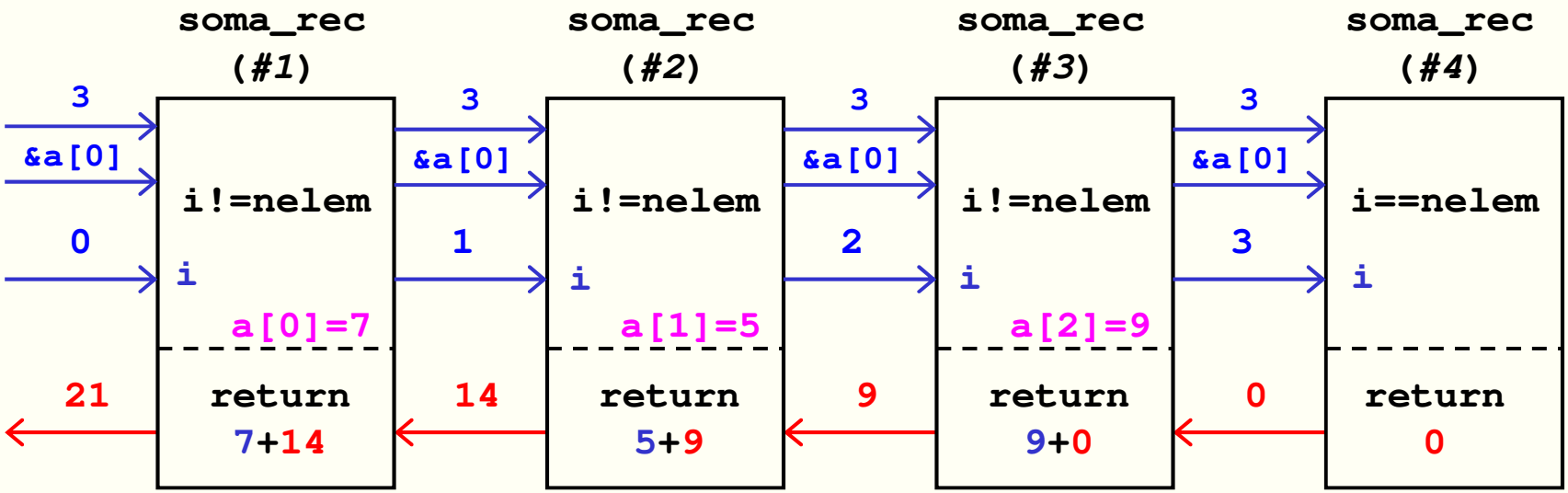
Recursividade – função soma()

```
int soma_rec (int *array, int i, int nelem)
{
   if (i != nelem)
        return array[i] + soma_rec (array, i + 1, nelem);
   else
        return 0;
}
```

Exemplo:

N° elementos do array "a": 3

Array inicializado com: a[0]=7, a[1]=5, a[2]=9



Recursividade – função soma()

```
int soma_rec (int *array, int i, int nelem)
{
    if (i != nelem)
        return array[i] + soma_rec (array, i + 1, nelem);
    else
        return 0;
}
```

A função **soma_rec()** pode ser simplificada, utilizando um **ponteiro para a posição do *array* a partir da qual se pretende obter a soma** (em vez do índice) e o **número de elementos do array que falta visitar** (em vez do número total de elementos).

```
int soma_rec (int *array, int nelem)
{
    if (nelem != 0)
        return *array + soma_rec (array + 1, nelem - 1);
    else
        return 0;
}
```

O segundo parâmetro representa o **número de elementos do *array* ainda não visitados**

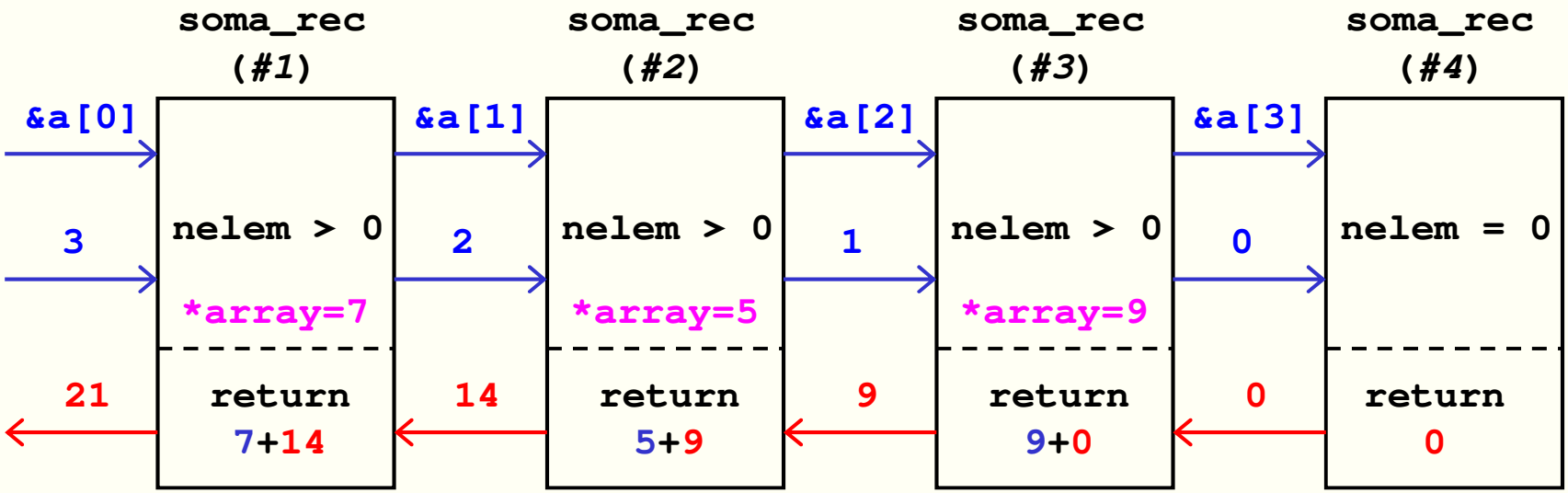
Recursividade – função soma()

```
int soma_rec (int *array, int nelem)
{
   if (nelem != 0)
        return *array + soma_rec (array + 1, nelem - 1);
   else
        return 0;
}
```

Exemplo:

N° elementos do array "a": 3

Array inicializado com: a[0]=7, a[1]=5, a[2]=9



Código correspondente em *Assembly* do MIPS

```
int soma_rec (int *array, int nelem)
{
   if (nelem != 0)
      return *array+soma_rec(array+1,nelem-1);
   else
      return 0;
}
```

```
soma_rec:
        beq     $a1, $0, else   # if (nelem != 0) {
        subu    $sp, $sp, 8     #   stack allocation
        sw      $ra, 0($sp)     #   save $ra
        sw      $s0, 4($sp)     #   save $s0
        move    $s0, $a0        #   $s0 = array
        addiu   $a0, $a0, 4     #   array + 1;
        sub     $a1, $a1, 1     #   nelem=nelem-1;
        jal     soma_rec        #   soma_rec(array+1, nelem-1);
        lw      $t0, 0($s0)     #   aux = *array;
        add     $v0, $v0, $t0   #   val = val + aux;
        lw      $ra, 0($sp)     #   restore $ra
        lw      $s0, 4($sp)     #   restore $s0
        addu    $sp, $sp, 8     #   free stack
        jr      $ra             #   return val;
                                # }
else:                           # else {
        li      $v0, 0          #
        jr      $ra             #    return 0; }
```

precisamos do valor do array porque precisamos de o guardar ja que depois vai ser alterado

Salvag. **$ra** (a sub-rotina não é terminal)

array é necessário depois da chamada à sub-rotina (copia para **$s0**)

O ***stack pointer*** tem obrigatoriamente que ser **atualizado antes de terminar a sub-rotina**